1. **مقدمه**

پیچیدگی سیستم‌های قدرت به دلایل: افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، اتخاذ مفاهیم جدید مانند شبکه­های هوشمند و دیجیتالی شدن کنترل سیستم‌های قدرت بر اساس سیستم‌های ارتباطی ناامن، در حال رشد است. دلایل فوق بطور مستقیم بر عملکرد، پایداری و امنیت سیستم‌های قدرت تأثیر می‌گذارند. از مهم‌ترین شاخص‌های سیستم‌های قدرت فرکانس و ولتاژ میباشد. اخیراً کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت به دلیل اهمیت آن، محبوبیت قابل توجهی را به خود جلب کرده است. با افزایش سطح نفوذ منابع تجدیدپذیر مانند مزارع بادی و نیروگاه‌های PV [[1]](#footnote-1)در سیستم‌های قدرت، عدم قطعیت مربوط به تولید توان اکتیو به طور قابل توجهی افزایش یافته، بنابراین تغییرات در فرکانس اتفاق می‌افتد [1].

عدم قطعیت تولید توان اکتیو هنگامی که سطح نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر مانند نیروگاه های بادی و نیروگاه های خورشیدی در شبکه های قدرت افزایش می یابند به شدت زیاد تر میشود ، که منجر به تغییرات فرکانسی می­شود. این افزایش در نوسانات توان اکتیو همراه با خصوصیت تصادفی بودن تقاضا، باعث می شود فرکانس سیستم قدرت به شدت نوسان کند [2]. این عدم تعادل توان و نوسانات بالای فرکانس، می‌تواند پایداری ولتاژ را تضعیف کند و در بدترین حالت، باعث فعال شدن رله‌های حفاظتی خاصی ‌شود که منجر به از دست دادن جزئی یا کلی سیستم قدرت ‌بشود[3].

خطوط انتقال که یک منطقه را به منطقه همسایه خود متصل می کنند، Tie-line نامیده می شوند. تقسیم توان بین دو منطقه از طریق این Tie-line ها انجام می شود. کنترل فرکانس بار ، همانطور که از نام آن پیداست، در حالی که فرکانس را ثابت نگه می دارد ،جریان توان بین مناطق مختلف را کنترل می کند[5] .طراحی کنترل موثر برای کنترل و حفظ فرکانس سیستم قدرت در هر منطقه و همچنین در خطوط ارتباطی (Tie-line) بین مناطق امری حیاطی به حساب میآید. هرگونه اختلال، نقطه عملکرد نامی یک سیستم قدرت را از مقدار مشخص قبلی آن تغییر می‌دهد. که نتیجه آن وقوع انحراف در نقطه های عملکرد مانند فرکانس نامی سیستم و برنامه‌ریزی تبادل توان با مناطق دیگر است ،که این اتفاق نامطلوب است.از آنجا که تنظیمات سیستم قدرت مدرن پیچیده است، نوسانات بر اثر هر اختلال ممکن است به مناطق گسترده دیگری منتشر شود و منجر به خاموشی در سیستم شود [4].

اگر تغییرات بار توسط دو ناحیه تولید به صورت موازی مدیریت شود، پیچیدگی سیستم افزایش می یابد. روش های تقسیم بار توسط دو ناحیه که توسط خط Tie-line به یکدیگر متصل شده اند عبارتند از: 1-اگر تغییر بار در ناحیه­ی A یا B رخ دهد و تولید A به گونه ای تنظیم شود که فرکانس ثابت باشد، این نوع تنظیم به عنوان تنظیم فرکانس صاف شناخته می شود. 2-روش دیگر تقسیم بار این است که هر دو A و B تولید خود را تنظیم کنند تا فرکانس را ثابت نگه دارند،این به عنوان تنظیم فرکانس موازی شناخته می شود. 3-دیگر امکان این است که تغییر در فرکانس یک منطقه خاص توسط ژنراتور آن منطقه مدیریت شود و در نتیجه بار Tie-line را حفظ کند. این روش به عنوان کنترل بار Tie-line صاف شناخته می شود. در کنترل فرکانس، هر سیستم در یک ناحیه تغییرات بار را در سیستم خود مدیریت می کند و به سیستم های دیگر کمک نمی کند، ناحیه­ها در کنترل بار Tie-line برای تغییرات خارج از محدوده ، بدون در نظر گرفتن اینکه تغییر فرکانس از کجا شروع می شود از تمام سیستم های قدرت در اتصالات کمک می­گیرد تا فرکانس را تنظیم کنند [5].

هدف LFC در یک سیستم قدرت متصل به هم ، که حفظ فرکانس هر منطقه در محدوده‌های مشخص و نگه‌داشتن جریان توان Tie-line در محدوده‌های میباشد ،با تنظیم مگاوات خروجی‌ ژنراتور ها به منظور سازگاری با تقاضاهای نوسانی بار انجام می‌شود [4].

میتوان آثار و تحقیقات کنترل فرکانس بار را بر اساس انواع متفاوتی از سیستم‌های قدرت تقسیم بندی کرد. سیستم‌های قدرت سنتی که از قرن‌ها قبل در عمل مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اساساً شامل واحدهای تولید حرارتی، هیدرو و هسته‌ای هستند. با این حال، با کاهش تدریجی منابع سوخت فسیلی و مسائل محیط‌زیستی ، منابع غیرسنتی انرژی به عنوان سیستم قدرت توزیع شده مشارکتی در شبکه اضافه شده اند. ، مدل‌های اصلی شامل سیستم قدرت یک منطقه ، سیستم قدرت دو منطقه ،سیستم قدرت سه منطقه ،سیستم قدرت چهار منطقه ، سیستم قدرت چند منطقه و مدل‌های قدرت حاوی عوامل غیرخطی میباشد[6].

همچنین به­منظور کنترل LFC (چه در یک ناحیه و چه در ساختارهای چند ناحیه­ای) داشتن یک الگوی کنترل موثر ضروری است. در ادبیات، کنترل های متعددی برای مسئله LFC ارائه شده است . با توجه به [1-2] میتوان این روش ها­ی کنترلی را به صورت زیر تقسیم بندی کرد.

1-روش‌های کنترل کلاسیک که بر طراحی کنترل‌کننده‌های PID [[2]](#footnote-2)برای کنترل فرکانس بار استفاده میشوند .2-روش‌های کنترل مدرن که شامل روش‌های کنترل بهینه و روش‌های کنترل مد لغزشی میباشند. 3-طرح‌های کنترل هوشمند مانند سیستم‌های کنترل فازی و روش های هوش مصنوعی 4-رویکردهای مبتنی بر محاسبات نرم برای تنظیم پارامترهای کنترل که در دهه اخیر توجه قابل توجهی از سوی پژوهشگران را به خود جلب کرده است.

کنترل پیش‌بین مدل (MPC[[3]](#footnote-3))، یک تکنیک کنترل پیشرفته است ،که در ابتدا در صنعت برای پلنت های شیمیایی و سیستم‌های دینامیکی به کار می‌رفت . مهم‌ترین ارزش MPC این است که این امکان را فراهم میکند، که با در نظر گرفتن بازه زمانی فعلی، بهینه‌سازی انجام شود و در عین حال بازه های زمانی آینده در نظر گرفته بشود. بنابراین، MPC قادر به پیش‌بینی رفتار آینده سیستم است و می‌تواند به تبع آن اقدامات کنترلی را بر روی سیستم اجرا کند. بطور کلی، MPC مربوط به سیستم‌های کنترل بهینه خطی است. با این حال، MPC قابل A screenshot of a computer

Description automatically generatedاستفاده در سیستم‌های خطی و غیرخطی متغیر با زمان نیز میباشد [7].

تصویر 1 – نمود کلی کنترل mpc در کنترل فرکانس بار

در ادامه تحقیق به صورت روبرو میباشد در بخش دوم کنترل فرکانس بار و همچنین منطق کنترل پیش بین به همراه ساختار های آن ارائه میشود . در بخش سوم تحقیقات گزشته شامل ساختار های پیاده سازی کنترل mpc مورد برسی قرار میگیرد و در بخش چهارم به بررسی کنترل های mpc ترکیب شده با روش های کنترلی دیگر و الگوریتم های هوش مصنوعی خواهیم پرداخت و در بخش آخر نتیجه گیری کلی تحقیق انجام خواهد شد .

2 – توضیح مسئله

**1.2 مسئله کنترل فرکانس بار به صورت کلی**

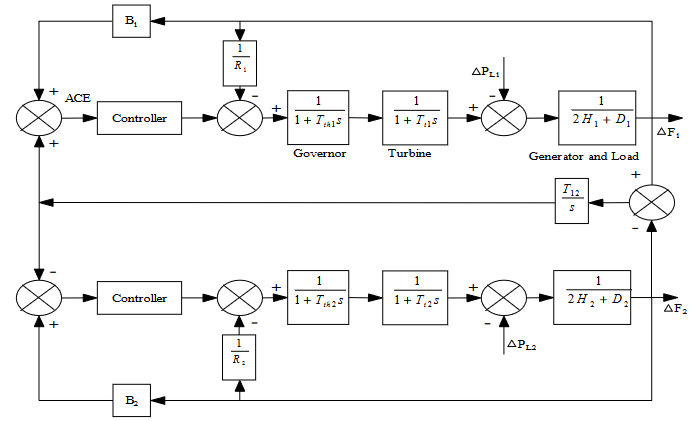
اگر تغییر کوچکی در توان بار در یک سیستم قدرت تک منطقه‌ای در حالت تعادل فرکانس رخ دهد، موجب عدم تطابق در تولید و تقاضا توان می‌شود. این مشکل در ابتدا توسط استخراج انرژی جنبشی از سیستم حل می‌شود، که در نتیجه باعث کاهش تدریجی فرکانس سیستم می‌شود. سیستم یک سری اقدامات کنترلی را ایجاد می‌کند تا تعادل را حفظ کند و در این حالت نیازی به عملکرد گاورنر نیست.کاهش فرکانس سیستم در این شرایط بسیار بزرگ است، با این حال در ادامه در اینجا گاورنرها وارد عمل میشوند و خروجی ژنراتور ها افزایش می‌یابد. وقتی بار جدید با کاهش توان مصرفی بار قدیمی و افزایش تولید به وسیله عملکرد گاورنر تعادل می‌یابد، در این حالت نقطه تعادل سیستم به دست می‌آید. از این رو، مقدار انرژی جنبشی که از سیستم استخراج می‌شود به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما به طور کامل نیست. بنابراین، کاهش فرکانس هنوز در این نوع تعادل وجود دارد، اما مقدار آن به مقداری کمتر از حالت قبلی میباشد. این نوع تعادل به طور کلی در 10 تا 12 ثانیه پس از افزودن بار به دست می‌آید. این عملکرد کنترلر را به عنوان کنترل اولیه نامیده می‌شود. بعد از وارد شدن گاورنر ها ، فرکانس سیستم هنوز از مقدار پیش تعیین شده خود متفاوت است و با استفاده از استراتژی‌های کنترل مختلف، نیاز است که فرکانس به مقدار تعیین شده از پیش بازگردد. به طور معمول، کنترل کننده‌های انتگرالی برای این منظور استفاده می‌شوند. این نوع کنترل، کنترل ثانویه نامیده می‌شود (که بعد از عملکرد کنترل اولیه عمل می‌کند) و فرکانس سیستم را به مقدار تعیین شده از پیش، یا نزدیک به آن می‌رساند.

در یک سیستم قدرت متصل به هم دو منطقه ای یا سیستم با تعداد بیشتر ناحیه ، که مناطق از طریق خطوط ،Tie-line به هم متصل می‌شوند، ممکن است جریان توان خطوط Tie-line تحت تأثیر قرار بگیرند. بنابراین، اطلاعات گذرا همه مناطق نیاز است تا توسط سیستم کنترلی در هر منطقه برای بازگرداندن مقادیر به مقدار از پیش تعیین شده برای کنترل توان خطوط Tie-line و فرکانس مناطق استفاده شود. [8]

A diagram of a machine

Description automatically generated

تصویر 1.3 کنترل LFC در یک سیستم تک ناحیه ای[2]



تصویر 2.3 کنترل LFC در یک سیستم دوناحیه ای [2

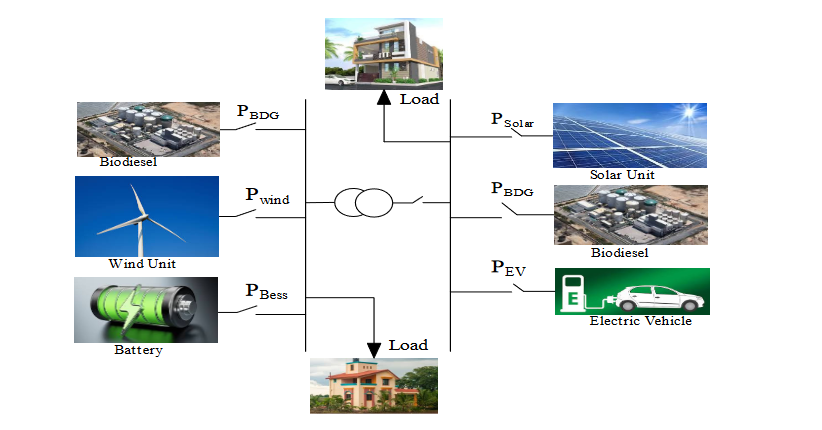
**2.2 مسئله کنترل فرکانس بار در میکرو گرید**

یک میکروگرید یک موجودیت مستقل است که می‌تواند در حالت متصل به شبکه یا در حالت جزیره ای کار کند. در صورت حالت اتصال به شبکه ، هدف اصلی معمولاً ارائه خدمات فرعی به سیستم بالا و بهینه سازی مدیریت انرژی است. از سوی دیگر، عملکرد جزیره ای MG [[4]](#footnote-4)می‌تواند برای تأمین نیازهای دورافتاده از بعد مکان یا بهبود کیفیت تامین برق در شبکه‌های ضعیف با قطع دستی از سیستم بالا دست، استفاده شود [9].

طراحی مناسب یک کنترل کننده میکروگرید باید شامل تمامی موارد زیر باشد: سیستم باید در یک نقطه عملیاتی پیش‌تعیین شده یا در محدوده‌ی امن عمل کند، توان اکتیو و راکتیو باید به بهینگی منتقل شود، پایداری سیستم باید حفظ شود، قطع و وصل میکروگرید باید بی‌عیب و نقص باشد و ظرفیت تولید منابع کوچک باید بر اساس مشارکت در بازار برق و تغییر توان شبکه اصلی بهینه شود. همچنین، بارها باید بر اساس حساسیت و اهمیت آن‌ها طبقه‌بندی شوند. در صورت وقوع خطا، میکروگرید باید قادر باشد در حالت جداگانه شروع به کار کند و در نهایت، سیستم های ذخیره‌سازی توان باید میکروگرید را پشتیبانی کرده و قابلیت اطمینان و کارایی آن را افزایش دهند. کنترل کننده‌های سلسله مراتبی میکروگرید به چهار سطح طبقه‌بندی می‌شوند[10].

سطح صفر: حلقه کنترل که داخلی برای کنترل ولتاژ و جریان خروجی منابع استفاده میشود . سطح یک: شامل کنترل کننده ­های اصلی که مرجع برای کنترل کننده‌های سطح صفر تولید می‌کند.سطح دو: کنترل کننده ثانویه با استفاده از روش‌های مختلف سیستم را در سطح کنترلی نظارت می‌کند. سطح سه: در جریان توان و ارتباطات بین میکروگرید و شبکه اصلی را مدیریت می‌کند.

هنگامی که MG در حالت جزیره ای عمل می‌کند، حفظ تعادل توان بین تقاضای و تأمین در حضور منابع تجدیدپذیر و تغییرات منظم بار وظیفه دشواری است. راه حلی که بیشتر برای این مشکل در MG های جزیره­ای استفاده شده است، ایجاد سیستم‌های پشتیبان مانند میکرو توربین‌ها و سیستم‌های ذخیره انرژی (ESSs) بوده است. تغییرات سرعت باد، تابش خورشید و بار ممکن است نوسانات توان بزرگ و شدیدی ایجاد کند. این نوسانات توان متغیر منابع تجدیدپذیر ممکن است مشکل جدی‌ای در نوسانات فرکانس سیستم ایجاد کند. بنابراین، برای کاهش نوسانات در فرکانس سیستم ناشی از عدم قطعیت های طبیعی منابع تجدیدپذیر مانند تغییر سرعت باد و تغییر تابش خورشید، کنترلرها در میکروگریدها استفاده می‌شوند [9].



تصویر 1.4- نمای یک میکرو گرید [2]

**3.2 کنترل پیشبین مدل (Model Predictive Controler)**

کنترل پیش‌بین مدل (MPC) یک فناوری پیشرفته است ،که در صنعت برای طراحی کنترل فرآیندهای چند متغیره و پیچیده استفاده می‌شود. ایده اصلی در MPC این است که با شروع از یک مدل فرآیند بدون کنترل، روابط دینامیک بین متغیرهای سیستم (ورودی‌های ، حالات داخلی و خروجی‌های اندازه‌گیری شده) توضیح داده شود. سپس، محدودیت‌ها بر روی متغیرهای سیستم اضافه می‌شود، شامل محدودیت‌های ورودی (معمولاً به دلیل اشباع عملگر) و محدوده‌های خروجی مطلوب که حالات و خروجی‌ها باید در آن وضعیت باقی بمانند.در ادامه مشخصات عملکرد مطلوب مسئله کنترل را کامل می‌کند و از طریق وزن‌دهی ها­ی متفاوت بر روی خطاهای ردگیری و تلاش‌های عملگر (مانند تنظیمات کلاسیک رگولاسیون خطی مربعی) بیان می‌شوند. بقیه طراحی MPC به صورت خودکار است. ابتدا، یک مسئله کنترل بهینه براساس مدل، محدودیت‌ها و وزن‌های داده شده ساخته می‌شود ،که یک مسئله بهینه‌ سازی وابسته به حالت اولیه و سیگنال‌های مرجع است. سپس، در هر زمان نمونه‌برداری، مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن حالت کنونی (اندازه‌گیری شده یا برآورد شده) به عنوان حالت اولیه مسئله کنترل بهینه حل می‌شود. به همین دلیل، این رویکرد به عنوان پیش‌بین شناخته می‌شود، زیرا در واقع مسئله کنترل بهینه بر روی یک بازه زمانی فرموله می‌شود که از زمان کنونی تا یک زمان مشخص در آینده ادامه میابد .

لازم به ذکر است که تنها نمونه اولین حرکت از این توالی بر روی فرآیند اعمال می‌شود و از حرکت‌های باقیمانده صرف نظر می‌شوند. در مرحله بعدی، یک مسئله کنترل بهینه جدید براساس اندازه‌گیری‌های جدید بر روی یک افق پیش‌بینی جدید حل می‌شود. به همین دلیل، این رویکرد همچنین به عنوان کنترل "افق پیشرونده" نیز شناخته می‌شود. تا زمانی که مدل به اندازه کافی دقیق باشد و شاخص عملکرد و محدودیت‌ها هدف‌های واقعی عملکرد را بیان کنند، MPC عملکرد نزدیک به بهینه را ارائه می‌دهد. با این حال، باید هشدار داد که تعادلی بین دقت مدل و پیچیدگی بهینه‌سازی وجود دارد[11].

سه رویکرد عمده برای طراحی کنترل پیش‌بین وجود دارد. هر رویکرد از یک ساختار مدل منحصر به فرد استفاده می‌کند. در فرمول‌بندی اولیه کنترل پیش‌بین‌، مدل‌های پاسخ ضربه محدود (FIR[[5]](#footnote-5))و مدل‌های پاسخ پله بهترین عملکرد را داشتند. پس از آن مدل‌های تابع تبدیل ارائه شد این مدل ها توصیف مقرون به صرفه تری از دینامیک فرآیند را ارائه می‌دهند و قابل استفاده برای پلنت پایدار و ناپایدار میباشند . کنترل پیش‌بین بر اساس مدل تابع تبدیل به طور معمول کمتر در کنترل پلنت چندمتغیره مؤثر است در دهه های اخیر شاهد رشد روزافزون طراحی کنترل پیش‌بین مدل با استفاده از روش‌های طراحی فضای حالت بوده ایم . در ادامه فرمول بندی کلی کنترل پیش بین مدل در فضای حالت ارائه خواهد شد [12].

سیستم تک ورودی تک خروجی زیر را درنظر بگیرید که به صورت یک سیستم فضای حالت گسسته میباشد دقت شود در آن از ماتریس سیسستم Dm صرف نظر شده است.

در اینجا، u متغیر تحت کنترل یا متغیر ورودی، y خروجی فرآیند، و xm بردار متغیر حالت است. توجه کنید که این مدل فرآیند u(k) را به عنوان ورودی خود دارد. بنابراین، ما باید مدل را به منظور سازگاری با هدف طراحی خود تغییر دهیم که در آن یک انتگرالگیر تعبیه شده باشد.دقت کنید انتگرالگیر در سیستم باعث حذف خطای حالت دائم میشود .

در ادامه برای ادغام سیستم با انتگرالگیر اختلاف متغیر های حالت را به صورت رابطه 3 در نظر میگیریم و همانند آن اختلاف متغیر ورودی را به صورت رابطه 4 قرار میدهیم و همچمین سیستم با در نظر گرفتن اختلافات به صورت رابطه 5 بدست میآید .

برای سیستم ادغام شده با انتگرالگیر متغیر حالت جدید به صورت رابطه 6 در نظر گرفته خواهد شد که برابر اختلافات حالات سیستم و خروجی سیستم است .

و همچنین با در نظر گرفتن خروجی به صورت رابطه 7 و با کنار هم گزاشتن روابط های3تا7 به مدل فضای حالت رابطه 8 میرسیم که به آن مدل ادغام شده میگویند .

در ادامه برای سادگی نوشتار مدل ادغام شده در روابط 8 به صورت 9 در نظر گرفته میشود .و از این مدل در محاسبات بعدی استفاده خواهد شد .

بعد از فرمول کردن مدل ، مرحله بعدی در طراحی یک سیستم کنترل پیش‌بین برای محاسبه خروجی پیش‌بینی شده پلنت با سیگنال کنترل آینده به عنوان متغیرهای قابل تنظیم است. این پیش‌بینی در یک محدوده بهینه‌سازی توصیف می‌شود. در این بخش، فرض می‌کنیم که زمان فعلی ki است و طول پنجره بهینه‌سازی Np به عنوان تعداد نمونه‌ها است.

*بر اساس مدل فضای حالت ادغام شده 9 ، پیش‌بینی متغیرهای حالت از لحظه نمونه‌برداری ki در یک بازه پیش‌بینی محدود NP (افق بیش بینی )می‌تواند به صورت بازگشتی از رابطه 9 حل شود. پیش‌بینی متغیرهای حالت در ki + Np به شرح زیر قابل محاسبه است.*

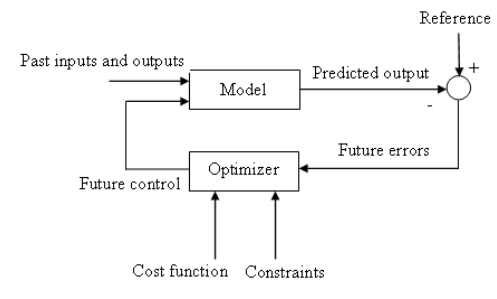
در ادامه برای محاسبات بردار های زیر را تعریف میکینم

در صورتی که سیستم تک ورودی و تک خروجی باشد، ابعاد Y برابر با Np و ابعاد ΔU برابر با Nc (افق کنترل)خواهد بود.

روابط بالا را میتوان به صورت زیر به صورت خلاصه نوشت

برای یک سیگنال رفرنس داده شده r(ki) در زمان نمونه ki، هدف سیستم کنترل پیش‌بین این است که خروجی پیش‌بینی شده را به حداکثر نزدیکی به سیگنال رفرنس برساند، به طوری که فرض می‌کنیم سیگنال رفرنس در محدوده بهینه‌سازی ثابت باقی می‌ماند. سپس این هدف با یک طراحی انجام میدهیم تا بردار پارامتر کنترل ΔU را بیابد که تابع خطا بین سیگنال رفرنس و خروجی پیش‌بینی شده را کمینه کند.برای این کار تابع هزینه را به صورت 16 درنظر میگیریم که که حل تحلیل آن به صورت 17 میباشد

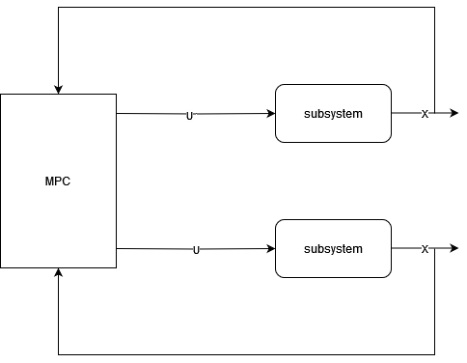
در ادامه سیگنال ورودی بدست آمده توسط 17 را به سیستم اعمال میکنم و محاسبات را برای سیگنال بعدی ازسر میگیریم . تصویر 1 نمای بلوک دیاگرام کنترلر پیشبین مدل را نشان میدهد .



تصویر 1.2 نمای بلوک دیاگرام کنترل MPC [7]

کنترل پیش‌بین (MPC) از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده می‌کند و با استفاده از یک مدل از سیستم، پیش‌بینی رفتار سیستم را با بهینه‌سازی خروجی برای تولید بهترین کنترل بهینه در لحظه زمانی حال انجام می‌دهد. در صورت استفاده از آن در کنترل (LFC)، با کمینه‌ سازی انحراف خطای حالت ماندگار، توان اکتیو Tie\_line و ACE(خطای کنترلی ناحیه )، پاسخ بهینه مناسبی پیدا میکند . یکی از اهداف دیگر آن تامین پایدار برق بدون هرگونه اختلال یا افت ولتاژ در زمان توزیع به مصرف‌کنندگان است. اما به دلیل افزایش اندازه سیستم های قدرت (از لحاظ جغرافیایی، امکانات و منابع تولید)، کنترل‌کننده‌های سنتی MPC کمتر قابل اعتماد میباشند ،همچنین تاثیر آن ها کمتر و محاسبات مورد نیاز، دشوارتر می‌شوند. این نقص کنترل‌کننده‌های MPC سبب بوجود آمدن ساختار های MPC دیگرمانند کنترل پیش بین A black background with white rectangles

Description automatically generatedA black background with white rectangles

Description automatically generatedغیرمتمرکز (De-MPC) و کنترل پیش بین توزیع شده (DMPC) شده است[13].

تصویر 2.2 ساختار متفاوتmpc

MPC یک روش ساده و مستقیم با محاسباتی کم است. اما مانند سایر الگوریتم‌های کنترلی، نیاز به انتخاب صحیح پارامترها قابل تنظیم برای بهبود عملکرد دارد. در MPC، برخی از پارامترهایی مانند افق پیش‌بینی Np، افق کنترل Nc، زمان نمونه‌برداری Ts و پارامتر تنظیم ورودی Rw وجود دارد . تنظیم MPC فقط از طریق تحلیل گسترده روابط کیفی و کمی این پارامترها در الگوریتم کنترلی بدست می آید .تأثیر این پارامترها بر رفتار MPC به صورت تصادفی با استفاده از روش آزمون و خطا برای کنترل فرکانس بار مورد مطالعه قرار گرفته است. شده است که مقادیر بهینه این پارامترها برای رفتار ایده‌آل MPC به جز Rw برای مطالعات موردی مختلف ثابت می‌ماند. بنابراین، ، ایده کنترل MPC تطبیقی فازی پیشنهاد می‌شود که در آن Rw یک عدد صحیح است و توسط کنترل‌کننده فازی در هر بازه پیش‌بینی MPC تنظیم می‌شود و سایر پروسه تغییر نمی‌کند. سه جزء اصلی کنترل منطق فازی عبارتند از: فازی‌سازی، قوانین فازی و فازی‌سازی مجدد که در بخش‌های زیر توضیح داده می‌شوند.[14] همچنین میتوان در آن از روش های دیگری مانند الگوریتم های فراابتکاری و روش های کنترل تطبیقی برای پاسخ هرچه بهتر استفاده کرد .

.در مقایسه با کنترل‌کننده‌های PID سنتی، باید توجه داشت که MPC وقتی محدودیت‌ها در میان باشند زمان بیشتری برای محاسبات آنلاین مصرف می‌کند. پارامترهای MPC بر اساس تکرارهای متوالی طراحی می‌شوند، که هنوز فرمول‌های ریاضی برای تعیین بهترین پیکربندی پارامترها آن توسعه داده نشده است. برای واقع‌گرایانه و قابل اعتماد‌تر بودن ، برخی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدرن برای بهینه‌سازی دقیق پارامترهای کنترل PID باید به فرآیند اعمال شود. حجم زیادی از ادبیات مقایسه عملکرد بین کنترل MPC و کنترل PID سنتی را در نظر می‌گیرد، که نتایج معمولاً به برتری قابل توجه MPC اشاره می‌کنند [6].

**3 برسی آثار در براساس ساختار های متفاوت کنترل MPC**

در این فصل به بررسی آثار پیشین در ضمینه کنترل فرکانس بار در ساختار های متفاوت کنترل پیشبین مدل، شامل ساختار متمرکزCE\_MPC/conventional\_mpc ، ساختار کنترل غیر متمرکز DE\_MPC و ساختار توضیع شده DMPC میپردازیم .

* 1. **ساختار CE\_MPC**

در کنترل پیشبین با ساختار متمرکز برای کنترل فرکانس بار در سیستم های قدرت تمامی عامل های کنترلی (شامل گاورنر ها و منابع ذخیره ساز انرژی ) توسط یک کنترلر پیشبین کنترل میشوند . در ادامه آثار با ساختار متمرکز برسی شده است .

در مرجع [15]از یک کنترلر MPC برای به دست آوردن پاسخ‌های دینامیک سیستم تک ناحیه ای با توربین بخار استفاده شده است. علاوه بر این،پاسخ کنترلر با کنترل PID سنتی مقایسه شده است . در مقایسه، بهبودهای قابل توجهی در مورد overshoot، undershoot و زمان نشست در سیستم به دست آمده است.

در مرجع [16] نویسندگان یک طرح کنترلر پیش بین مدل برای کاربرد کنترل تولید خودکار در یک سیستم قدرت دو منطقه ای متصل به هم، که شامل واحدهای تولید حرارتی، هیدرو و بادی است ارائه داده اند . همچنین مقایسه عملکرد کنترل تولید خودکار مبتنی بر MPC با کنترل‌کننده‌های تولید خودکار کلاسیک PI و PID ارائه شده است . مطالعه مقایسه‌ای نشان می‌دهد که MPC پیشنهادی پاسخ دینامیک بهتری را برای سیستم مذکور در زمینه زمان نشست، overshoot و undershoot داشته است.

در مرجع [17]نویسندگان یک سیستم حرارتی متصل به سلول‌های خورشیدی (PV) تک ناحیه ای و دو ناحیه­ای با حفظ عملکرد PV در نقطه بیشینه توان (MPP[[6]](#footnote-6))، را مورد مطالعه قرار داده­اند . مشکل اصلی در اتصال این سیستم‌ها، نوسانات عدم قطعیت های محیطی میباشد. بنابراین برای حل مشکل کنترل MPC پیشنهاد شده است. همچنین در ادامه با مقایسه‌ای با سایر کنترل‌کننده‌های کلاسیک، از جمله کنترل کننده PI با الگوریتم ژنتیک، کنترل کننده PI با شمع پروانه‌ و کنترل کننده PI ،نشان داده شده است که به وضوح عملکرد MPC نسبت به تمام کنترل کننده‌های مذکور بهتر میباشد.

در مرجع [18] نویسندگان ، یک روش کنترل مقاوم برای کنترل فرکانس بار دو منطقه ارائه داده اند . و همچنین مقایسه‌ای بین عملکرد کنترل کننده پیش‌بین مدل و کنترل کننده بهینه شده (PID) در سیستم‌های مختلف ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای تنظیم پارامترهای PID استفاده شده است . مقایسه بین عملکردهای MPC و PID بهینه ، نشان از کارآمدی و مقاومت روش‌ پیشنهادی ،توسط شبیه‌سازی تحت سناریوهای مختلف مانند تغییرات بار و تغییرات پارامترها را نشان میدهد.

در مرجع [19] نویسندگان یک استراتژی با هدف اصلاح پاسخ‌های فرکانسی سیستم را با در نظر گرفتن دینامیک توربین بادی و پیش‌بینی توان خروجی ارائه داده اند . در این اثر ابتدا، مدل پاسخ فرکانسی (FRM[[7]](#footnote-7)) سیستم که شامل کنترل LFC سیستم قدرت و توربین بادی است، ایجاد میشود . در مرحله بعد، از طریق گسسته‌سازی FRM، یک مدل پیش‌بین برای سیستم بدست میآید . برای اثبات اثربخشی استراتژی پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی بر روی یک سیستم قدرت تک ‌ناحیه ای و یک سیستم قدرت چهار ‌ناحیه ای انجام شده است و همچنین با مقایسه با MPC بدون در نظر گرفتن مدل دینامیک توربین بادی و کنترل PID کلاسیک، مقایسه شده است . نتایج عددی نشان از اثربخشی و قابل اجرا بودن استراتژی LFC مبتنی بر MPC پیشنهادی و مزیت‌های آن نسبت به روش‌های مذکور میدهد.

در مرجع [20]برای یک سیستم قدرت 2 ناحیه ای و 4 ناحیه ای شامل منابع حرارتی با استفاده از محدودیت های نرخ تولید (GRC[[8]](#footnote-8))ارائه شده است. و همچنین مقایسه عملکرد کنترل کننده‌های دیگر مانند (MPC)، (PID) و Fuzzy cascaded PID انجام شده است. دیده می‌شود. با بررسی سناریو های تست متفاوت تحت شبیه سازی در تمام موارد، به جز برخی از نوسانات در پاسخ، MPC عملکرد بهتری نسبت به سایر کنترل کننده‌ها، به ویژه از نظر زمان نشست دارد.

در این مرجع [21]، طراحی کنترل LFC بر اساس MPC مرکزی برای کنترل سیستم قدرت چند منطقه ای پیشنهاد شده است. MPC برای مسئله LFC را به عنوان یک مسئله کنترل پیگیری در حضور اختلالات خارجی و محدودیت‌ها مدل شده است. و همچنین اثربخشی طرح پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی‌های بر روی یک سیستم چند ناحیه ای متصل ،با در نظر گرفتن 10 ژنراتور و سیستم 5 ناحیه ای بررسی شده است .

در مرجع [22] نویسندگان یک کنترل پیش بین مدل برای کنترل فرکانس بار و بازیابی ولتاژ در میکروگرید تک نهحیه ای ‌جزیره­ای AC پیشنهاد کرده­اند . نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به طور موثر ولتاژهای مرجع خود را با خطای حالت پایدار صفر دنبال می‌کند و همچنین ولتاژ و فرکانس را به مقدار نامی خود تنظیم می‌کند.

در رفرنس[23] کنترل فرکانس بار بر اساس کنترل پیش‌بینی مدل برای یک میکروگرید جزیره ای با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی طراحی شده است . مدل میگروگرید ارائه شده در این اثر شامل یک ژنراتور دیزل (DG) و دو خودروی الکتریکی میباشد . نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وقتی سیستم با نوسانات بار مواجه می‌شود، کنترل کننده MPC پیشنهادی قادر است خروجی زیر سیستم را محاسبه کرده و سریعاً نوسان فرکانس را از بین ببرد، این حذف نوسان در حضور اعمال محدودیت‌های EVs [[9]](#footnote-9)و سیستم دیزل میباشد.

در رفرنس [24]یک کنترل (MPC) برای پایدارسازی فرکانس در سیستم قدرت با در نظر گرفتن عوامل غیر خطی ذاتی در نظر گرفته شده است ،سیستم اراده شده شامل منابع تولید انرژی مانند تولید بازگرمایی و تولید غیر باز رمایی و نیروگاه آبی و همچنین مزرعه­ی بادی میباشد برای صحت سنجی کنترل ارائه شده سیستم با کنترل تحت نرم افزار متلب شبیه سازی شده است .

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ref | System  Type | Conventional  source | RESs | ESS | Opt | Controller |
| [15] | 1.area | Steam turbine | \_ | \_ | ­\_ | Conventional MPC |
| [16] | 2.area | Hydro  thermal | Wind turbine | \_ | \_ | Conventional MPC |
| [17] | 1.area/2.area | Thermal | PV |  | \_ | Conventional MPC |
| [18] | 2.area | thermal |  |  | \_ | Conventional MPC |
| [19] | 4.area | \_ | Wind turbine | \_ | \_ | Conventional MPC considering FRM |
| [20] | 2.area/4.area | Thermal | \_ | \_ | \_ | Conventional MPC considering GRC |
| [21] | Multi area | DG | \_ | \_ | \_ | Conventional MPC |
| [22] | AC Micro gide | DG | \_ | \_ | \_ | Conventional MPC |
| [23] | Micro gide  1.area | DG | \_ | EV | \_ | Conventional MPC |
| [24] | 1area | Reheat  Non\_ Reheat  Hydro | Wind turbine | \_ | \_ | Conventional MPC |

**2.3 ساختار DE\_MPC**

در ساختار کنترل پیشبین غیر متمرکز DE\_MPC برای هر یک از واحد های کنترلی به صورت محلی یک کنترل پیشبین مدل در نظر گرفته میشود و هر واحد مسئول کنترل حوضه ی خود میباشد . در ادامه آثار با ساختار غیر متمرکز آورده شده است .

در رفرنس[25]، عملکرد یک ژنراتور توربین موجی (TTG) ، دیزل ژنراتور و خودروهای الکتریکی متصل هیبریدی (PHEVs) در یک سیستم قدرت هیبریدی برای کنترل فرکانس بار مورد بررسی قرار گرفته شده است. عملکرد حلقه‌های کنترل مختلف مانند حلقه کنترل زاویه پره TTG، حلقه کنترل تکمیلی ژنراتور و حلقه کنترل قدرت PHEVs از طریق اجرای کنترل پیش‌بین مدل مبتنی بر جستجوی هارمونی نیمه ‌مخالف (QOHSA) ارائه شده است. برای برتری روش پیشنهادی QOHSA در کاهش انحراف فرکانس پس از اختلال، عملکرد آن با عملکرد حاصل از کنترل‌کننده‌هایMPC معمولی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر مقایسه شده است . نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند به طور قابل توجهی نوسانات فرکانس را کاهش دهد.

در مرجع [26] یک طرح کنترل ارائه شده است تا نوسانات فرکانس در سیستم‌های قدرت با وجود منابع تولید انرژی تجدیدپذیر RESs [[10]](#footnote-10)را کنترل کند. در اثر نویسنده دو مورد شبکه را مورد بررسی قرار داده است : مدل اول سیستم 100٪ RESs با تولید فتوولتائیک (PV[[11]](#footnote-11))، تولید بادی (WG[[12]](#footnote-12))، سلول سوختی، الکترولیزر آب دریا و باتری ذخیره‌ساز است و مدل دوم که یک سیستم قدرت 10 باس جزیره اوکیناوا در ژاپن است که شامل تولید حرارتی، PV، WG و باتری ذخیره‌سازی است، نتایج برسی نشان داده است که توانایی روش کنترل پیشنهادی در تخمین نوسانات فرکانس و حفظ آن در محدوده مجاز مورد قبول میباشد . علاوه بر این، نویسنده موفق به کنترل انواع مختلف تقاضای بار برای کاهش عدم تطابق تولید-بار و به تبع آن حفظ پایداری سیستم قدرت شده است.

در مرجع [27]نویسندگان یک کنترل کننده (MPC) را برای تنظیم فرکانس سیستم‌های میکروگرید خارج از شبکه با بارهای ولتاژ حساس پیشنهاد داده اند. کنترلر پیشنهاد شده در اثر، با استفاده از حساسیت ولتاژ بار، کنترل فرکانس سیستم را از طریق ولتاژهای عملیاتی تنظیم می‌کند علاوه بر این، با عدم نیاز به ارتباطات بین میکروگریدها، بار ارتباطی و محاسباتی به شدت کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی روی یک سیستم بنچمارک IEEE اصلاح شده، اثربخشی کنترل کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در رفرنس [28] یک طراحی کنترلی با استفاده از کنترل (CeMPC) و کنترل (DeMPC) برای خودروهای الکتریکی و توربین‌های بادی در شبکه ی هوشمند(SG)پیشنهاد شده است. در این بررسی، یک سیستم SG چهار منطقه‌ای متصل به یکدیگر در نظر گرفته شده است. کارایی استفاده از کنترلر های CeMPC و DeMPC با استفاده از شبیه سازی بررسی شده است.

در رفرنس [29] یک استراتژی کنترل بر اساس روش کنترل پیش‌بین مدل با طرح‌ های مختلف برای یک سیستم قدرت دو ناحیه ای غیرمتقارن ترکیبی ارائه شده است . مدل مطالعه شامل حلقه‌های تحریک ولتاژ و فرکانس با تعاملات لازم بین آنها است. در این مدل از یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی همراه با انرژی باد استفاده شده است. همچنین صحت کنترل طبق شبیه سازی اثبات گردیده است.

در مقاله،[30] کنترل هماهنگ شده ی زاویه پره‌های توربین بادی و خودروهای الکتریکی هیبریدی با قابلیت اتصال به شبکه (PHEV) برای کنترل فرکانس بار میکروگرید با استفاده از کنترل‌ها(MPC) پیشنهاد می‌شود. کنترل توان PHEV مبتنی بر MPC می‌تواند به طور موثری نوسان فرکانس میکروگرید را کاهش دهد. با این حال، برای سیستم‌های بزرگ، تعداد زیادی از PHEVs برای تولید انحراف فرکانس مطلوب نیاز است. برای کاهش تعداد PHEVs، در این اثر نویسندگان ، با استفاده از کنترل زاویه پره‌ها با استفاده از روش MPC، هموار سازی تولید انرژی بادی پیشنهاد کرده اند و با کنترل PHEVs هماهنگ می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل هماهنگ زاویه پره‌ها و PHEVs با استفاده از MPC می‌تواند تعداد PHEVs را کاهش داده و نوسان فرکانس را به طور قابل توجهی کنترل کند.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ref | System  Type | Conventional  source | RESs | ESS | Opt | Controller |
| [25] | 1.area | DG | TTG | PHEV | QOHSA | De\_MPC |
| [26] | 1.area/1.area | thermal | Wind turbine  PV  Electrolizer | FC  BESS | \_ | DE\_MPC |
| [27] | Micro gide  1.area | DG | Wind turbine | \_ | \_ | De\_ MPC |
| [28] | Smart grid  4.area | \_ | Wind turbine | EV | \_ | De\_MPC  Conventional \_MPC |
| [29] | Micro gide  2.area | Reheat  microturbine | Wind turbine | flywheel | \_ | De\_ MPC |
| [30] | Micro gide  1.area | Thermal | Wind turbine | Phev | \_ | De\_ MPC |

**3.3 کنترل پیشبین با ساختار DMPC**

در ساختار توضیع شده کنترل پیشبین (DMPC) همانند ساختار غیر متمرکز برای هر واحد کنترلی از یک کنترل پیشبین جدا استفاده شده است با این تفاوت که بین واحد های کنترل متفاوت ارتباط وجود دارد . آثار در این ضمینه در ادامه آورده شده است .

در مرجع[31] نویسندگان یک (MPC) برای یک سیستم قدرت دو منطقه ای که شامل HPWH [[13]](#footnote-13)است برای کنترل فرکانس ثانویه پیشنهاد کرده­اند . روش MPC با استفاده از بهینه‌سازی بر پایه برنامه‌ریزی مربعاتی ، سیگنال‌های کنترل آینده را پیش‌بینی می‌کند همچنین اثر عملکرد موثر روش پیشنهادی برای سیستم قدرت دو منطقه ای با HPWH برای سناریوهای مختلف تغییرات بار، تولید توان تجدیدپذیر گسسته و تغییرات پارامتری به عنوان تحلیل حساسیت نشان داده شده است.

در مرجع [32]نویسندگان یک روش DMPC C-[[14]](#footnote-14)برای کنترل فرکانس بار سیستم قدرت AC/DC را پیشنهاد کرده­اند. سیستم قدرت همبسته AC/DC سه منطقه شامل نیروگاه خورشیدی، نیروگاه حرارتی و نیروگاه دیزل است که هر منطقه کنترلی دارای یک کنترل‌کننده MPC محلی است که سه کنترل‌کننده با تبادل اطلاعات خود از طریق WAMS [[15]](#footnote-15)با یکدیگر هماهنگ می‌شوند. نتایج شبیه سازی نشان میدهد روش C-DMPC پیشنهادی در مقایسه با دیگر روش‌ها ارائه شده در مقاله (NC-DMPC[[16]](#footnote-16)) در مورد overshoot و زمان نشست بهبود ایجاد میکند .

در مرجع [33]یک روش کنترل پیش‌بین اقتصادی توزیع شده (EMPC[[17]](#footnote-17)) برای توزیع بار اقتصادی و کنترل فرکانس بار سیستم‌های قدرت متصل به هم پیشنهاد شده است. در تحقیق یک تابع هزینه اقتصادی عمومی در EMPC استفاده شده است تا دنباله کنترل را مستقیماً بهینه‌سازی کند و عملکرد اقتصادی سیستم را بدون استفاده از یک ساختار کنترل سلسله مراتبی بهینه‌سازی کند. استراتژی EMPC توزیع شده پیشنهادی برای هماهنگی ELD [[18]](#footnote-18)و LFC در یک سیستم قدرت چهار منطقه‌ای متصل به یکدیگر استفاده شده است .باتوجه به رفرنس . شاخص‌های اقتصادی مستقیماً در تابع هدف اقتصادی در نظر گرفته شده اند تا سود اقتصادی سیستم را بیشینه کند. الگوریتم EMPC توزیع شده می‌تواند عملکرد کنترل سیستم در سراسر سیستم را بهبود داده و نیاز به محاسبات را کاهش دهد.

در مرجع [34] نویسندگان ، یک روش کنترل پیش‌بین فرکانس بار توزیع‌شده بر اساس PEO-EDMPC[[19]](#footnote-19) برای سیستم قدرت چند منطقه‌ای متصل به هم ارائه کرده اند . مجموعه‌ای از شبیه‌سازی در دو سیستم‌ قدرت دو منطقه‌ای و سه منطقه‌ای متصل به هم نشان داده است که PEO-EDMPC عملکرد بهتری نسبت به یک DMPC سنتی ، PEO-DPI و یک DI سنتی در شرایط پارامترهای نرمال، اختلالات پارامتر سیستم و اختلالات دینامیک بار از خود نشان می‌دهد.

در مرجع [35] نویسندگان یک طرح کنترل پیش‌بین مدل توزیع‌شده (DMPC) برای تنظیم فرکانس سیستم‌های قدرت چند منطقه‌ای با منابع قدرت تجدیدپذیر و انواع مختلف واحدهای قابل کنترل از جمله ژنراتورهای سنکرون، بارهای انعطاف‌پذیر و دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی پیشنهاد کرده است. بررسی نشان می‌دهد که روش کنترل طراحی شده در دو هدف نویسنده شامل حفظ فرکانس سیستم و تبادلات توان درون منطقه ای و محدود کردن متغیرهای سیستم مانند فرکانس بار، تولید/مصرف توان هر واحد قابل کنترل، نرخ رمپ ژنراتورها و سطوح انرژی ذخیره شده در دستگاه‌های ذخیره‌سازی در حد عملیاتی خود موثر بوده است.

در [36] سیستم شبکه هوشمند SG [[20]](#footnote-20)مبتنی بر EVs [[21]](#footnote-21) ارزیابی شده است . چهار منطقه کنترل مختلف برای مدل در نظر گرفته شده است و تغییرات بار در زمان های نمونه برداری مختلف پیش بینی شده است برای کنترل فرکانس بار از کنترلر های PID، CMPC[[22]](#footnote-22) و DPMC [[23]](#footnote-23)استفاده میشود. از نتایج به دست آمده توسط شبیه سازی ، مشخص است که کنترل‌کننده DMPC عملکرد برتری نسبت به سایر کنترل‌کننده‌ها دارد و همچنین ‌سرعت نوسانات را کاهش می‌دهد.

در رفرنس[37] نویسندگان بررسی کنترل فرکانس بار یک smart grid چهار ناحیه ای شامل آرایه های pv ، خودرو های التریکی ،دیزل ژنراتور و مزعه ی بادی کنترل mpc را انجام داده اند ونتایج با کنترلر های کلاسیک ادغام شده باروش های هوش مصنوعی بررسی کرده­اند. نتایج نشان میدهد روش FOPID همرا با الگوریتم فازی جواب بهتری را میدهد .

در رفرنس[38] تمرکز بر روی خودروهای برقی در کنترل فرکانس بار است. اما این مسئله با دو چالش اصلی مواجه است. اولین چالش، نوسانات پس از اختلال در فرکانس است که پس از تاخیر زمانی در سیستم وجود میآید. برای مقابله با این نوسانات، دو رویکرد پیشنهاد شده است. یکی از آنها استفاده از محدودیت‌ها در طراحی کنترل پیش‌بین مدل برای کنترل فرکانس بار است. در حالی که رویکرد دیگر ساپرت از اینرسی و droop نیروگاه بادی بر پایه DFIGمیباشد .چالش دوم متغیر بودن منابع، به ویژه ظرفیت خودروهای برقی برای کنترل فرکانس بار است. به دست آوردن عامل مشارکت دینامیک برای این منابع، با موفقیت تغییرات در ظرفیت آنها را برطرف میکند .

در [39]رفرنس نویسندگان یک طرح (DMPC) برای مسئله (LFC) سیستم قدرت چند منطقه‌ای در حضور توربین‌های بادی (WTs) پیشنهاد داده¬اند. کنترل‌کننده پیش‌بینی شده توزیع‌شده به عنوان مسئله کاهش اغتشاش در حضور اختلالات خارجی و محدودیت‌های که نشان‌دهنده رفرنس تنظیم بار میباشد ، محدودیت نرخ تولید (GRC) و محدودیت‌های ورودی کنترل WT هستند، طراحی شده است . مدل پاسخ فرکانس سیستم قدرت مرتبط سه منطقه‌ای شامل مزرعه ی بادی و منابع تولید انرژی سنتی پیاده و تست شده است ، که مدل WT به عنوان بخشی از سیستم قدرت در LFC مشارکت می‌کند.

در رفرنس[40] نویسندگان ، یک کنترل پیش‌بین مدل چندمتغیره و مقاوم برای حل مسئله کنترل فرکانس بار (LFC) در یک سیستم قدرت چندمنطقه‌ای پیشنهاد کرده­اند . طرح کنترل پیشنهادی برای در نظر گرفتن ماهیت چندمتغیره LFC، عدم قطعیت های سیستم و محدودیت نرخ تولید طراحی شده است. برای دستیابی به مقاومت در برابر عدم قطعیت سیستم و تغییرات پارامترها، از رویکرد مبتنی بر نابرابری ماتریس خطی (LMI) استفاده شده است . طرح پیشنهادی در اینجا به طور همزمان ماهیت چندمتغیره LFC، GRC و مقاومت در مقابل عدم قطعیت های سیستم را در نظر می‌گیرد. . برای دستیابی به این اهداف، یک طراحی دو مرحله‌ای انجام می‌شود. در ابتدا، یک طراحی MPC چندمتغیره با در نظر گرفتن GRC انجام می‌شود. اما، طراحی چندمتغیره قادر به اختصاص اقتصادی تولید برق تولید شده نیست. برای رفع این نقص، یک عبارت اضافی به تابع هزینه کنترل اضافه می‌شود. تکنیک MPC پیشنهادی خروجی خود را بر اساس کمینه‌سازی تابع هزینه چند هدفه با محدودیت GRC بدست میآورد. سپس، برای ارتقاء ، عدم قطعیت های مدل سیستم با استفاده از چند مدل توصیف می‌شود. سپس مسئله به یک بهینه‌سازی بدترین حالت تبدیل می‌شود که به یک کمینه‌سازی محدب شامل نابرابری ماتریس خطی (LMI) کاهش می‌یابد.

در رفرنس [41]یک کنترل پیشبین مدل برای کنترل فرکانس بار بر اساس یک تکنیک دیکاپلینک در یک سیستم قدرت چند منطقه‌ای ارائه شده است .در این ساختار با در نظر گرفتن جریان کلی برق ورودی هر منطقه به عنوان متغیرهای ورودی، مدل خطی دیکاپل شده برای هر منطقه استخراج می‌شود.و این امکان را به وجود می‌آورد که یک مسئله کنترل پیش‌بین مدل با یک شاخص عملکرد کوادراتیک و محدودیت‌های اشباع ورودی در جریان‌های توان خطوط ارتباطی مستقل همراه با محدودیت های تساوی کلی برای متعادل کردن انرژی شبکه را تشکیل و حل شود . برای اثبات روش پیشنهاد شده از یک سیستم سه ناحیه ای برای شبیه سازی استفاده شده است.

در رفرنس [42]با فرض اینکه متغیرهای حالت توسط کنترل‌کننده‌های محلی از طریق تخمین یا اندازه‌گیری قابل دریافت باشند، یک استراتژی کنترل پیش‌بین مدل اقتصادی توزیع شده برای مسئله کنترل فرکانس بار یک سیستم قدرت چند منطقه‌ای با در نظر گرفتن نیروگاه‌های بادی در مدل بازار نیرو ارائه شده است. در عین حال، بهینه‌سازی اقتصادی در زمان واقعی با تلفیق عوامل اقتصادی در تابع هدف انجام شده است. مسئله بهینه‌سازی اقتصادی گسسته محلی هر زیرسیستم شامل سه بخش است: که شامل هزینه از دست رفتن سوخت، هزینه تولید بادی و کنترل فرکانس بار میباشد . کنترلر ارائه شده در مسئله بهینه‌سازی سیستم قدرت در حضور اغتشاشات خارجی و محدودیت‌های از جمله محدودیت نوسان فرکانس، محدودیت ورودی کنترل، محدودیت توان خروجی نیروگاه‌های بادی و محدودیت زاویه پیچ توربین بادی حل میشود .

در مرجع [43] نویسندگان با برسی مدل ریز شبکه کلی و مجموعه ای از ریز شبکه ها یک کنترل کننده بر اساس کنترل پیش‌بین مدل توزیع شده (DMPC) برای تنظیم فرکانس ارائه کرده اند در طرح پیشنهادی، فرکانس با تنظیم ولتاژ بارهای حساس از طریق MPC تنظیم می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی در حالت‌های گسترده نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی با در نظر گرفتن محدودیت‌های ولتاژ باعث کاهش انحراف فرکانس ناشی از نوسان انرژی‌های تجدیدپذیر می‌شود .

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ref | System  Type | Conventional  source | RESs | ESS | Opt | Controller |
| [31] | 2.area | Hydro  Thermal  DG  HPWH | PV | \_ | \_ | Qadprg\_ DMPC |
| [32] | 3.area AC/DC | DG  Thermal | PV | \_ | \_ | C-DMPC |
| [33] | 4.area | Thermal  DG | Wind turbine | \_ | \_ | Economic DMPC |
| [34] | 2.area/3.area | DG | \_ | \_ | \_ | population extremal optimization-based extended distributed model predictive |
| [35] | Multi area | Syn.generators | \_ | BESS | \_ | DMPC |
| [36] | Smart gide  4.area | DG | Wind turbine | EV | \_ | CMPC/ DMPC |
| [37] | smart grid 4.area | SG | Wind turbine  PV | \_ | \_ | D MPC |
| [38] | Islanded | Non reheat | \_ | EV | \_ | D MPC |
| [39] | 4.area | Steam  termal | Wind turbine | \_ | \_ | D MPC |
| [40] | 3.area | DG | \_ | \_ | \_ | D MPC |
| [41] | 3.area | SG | \_ | \_ | \_ | DMPC |
| [42] | \_ | Thermal | Wind turbine | \_ | \_ | EDMPC |
| [43] | Micro gide  2.area | DG | Wind turbine |  | \_ | DMPC |

**4- کنترل mpc و ترکیب با الگوریتم های دیگر در مسئله یکنترل فرکانس بار**

**1.4 بررسی آثار کنترل پیشبین تطبیقی**

کنترل‌ کننده‌های (MPC) سنتی دارای یک ضعف جدی میباشند زیرا در رنج عملکردی شاخصه های کنترلی مناسب ندارند . بنابراین، برای استفاده از آنها در کنترل پلنت ، چند گزینه وجود دارد که به شرح زیر است[44]:

الف. اگر یک مدل سیستم خطی نمی‌تواند به صورت آنلاین بدست بیاید، ابتدا باید چندین مدل خطی آفلاین در شرایط عملکرد مختلف تهیه شود. بنابراین، باید یکی از رویکردهای زیر برای اجرای استراتژی MPC انتخاب شود:

1-معرفی چندین MPC آفلاین، به عنوان یک MPC برای هر مدل پلنت و در زمان اجرا ترکیب این MPC‌ها و تغییر آنها از یک مدل به مدل دیگر، بسته به استراتژی زمان ‌بندی مورد نظر انجام میشود .

2-طراحی یک MPC آفلاین تکی در ابتدا که در زمان عملکرد، به صورت یک کنترل‌کننده MPC آنلاین (AMPC) راه‌اندازی می‌شود (با به‌روزرسانی مدل پیش‌بینی شده در هر بازه کنترل)، که از یک سیستم خطی پارامتر متغیر (LPVS[[24]](#footnote-24)) تشکیل شده است (که یک مدل خطی از پلنت با استراتژی زمان‌بندی ارائه می‌دهد).

ب. اگر یک مدل خطی آنلاین از پلنت حاصل شود، برای دستیابی به کنترل غیرخطی با عملکرد بالا، باید از AMPC استفاده شود. دو روش معمول برای به دست آوردن یک مدل خطی و آنلاین از پلنت به صورت زیر توصیف می‌شوند:

1-خطی‌سازی پیاپی: این رویکرد در حالتی استفاده می‌شود که یک مدل غیرخطی از پلنت وجود دارد که می‌تواند در زمان اجرا خطی‌سازی شود. در مورد سیستم قدرت، پارامترهای سیستم ممکن است تغییر کنند، بنابراین مدل پلنت ممکن است با گذر زمان تغییر کند.

2-تخمین آنلاین: این روش برای یک سیستم حلقه بسته خطی مناسب است. این رویکرد زمانی استفاده می‌شود که نمی‌توان یک مدل خطی را از یک سیستم LPVS یا خطی‌سازی پیاپی به دست آورد.

در ادامه آثار شامل ترکیب کنترل مدل پیشیبین و کنترل تطبیقی ارائه میشود.

در [44] نویسندگان یک سیستم کنترل فرکانس را با استفاده از ترکیبی از کنترل کننده پیش‌بین مدل قابل تطبیق (AMPC[[25]](#footnote-25)) و تخمین گر مدل چندجمله ای بازگشتی (RPME[[26]](#footnote-26)) با توربین‌های بادی با ,DFIG [[27]](#footnote-27)معرفی کرده اند . در این پژوهش در هر دوره کنترل، RPME یک مدل خود بهینه‌ساز زمان گسسته را شناسایی می‌کند. این مدل به وسیله AMPC برای کنترلر مدل داخلی سیستم استفاده می‌شود تا به کنترل غیرخطی موفق برسد. عملکرد سیستم پیشنهادی با استفاده از شبیه سازی تایید شده است و همچنین در اثر با سیستم MPC سنتی مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی برتری سیستم پیشنهادی را نسبت به سیستم MPC سنتی نشان می‌دهد.

در مرجع [45] نویسندگان یک تکنیک کنترل پیش بین مدل تطبیقی (AMPC) برای کنترل فرکانس بار یک سیستم قدرت دو منطقه ای با یک شبکه میکروگرید مستقل ارائه داده اند همچنین تأثیر تغییرات پارامترهای سیستم بر عملکرد کنترل برای کنترل فرکانس در یک میکروگرید مستقل نیز مورد بررسی قرار گرفته است.در ادامه نویسندگان تأثیر محدودیت‌های فیزیکی خاصی که بر عملکرد دینامیک سیستم قدرت، مانند توربین بازگرمایی (RT[[28]](#footnote-28))، تاخیر زمانی (TD)، محدودیت نرخ تولید (GRC) و باند مرده (DB[[29]](#footnote-29)) برای توربین بخار، بررسی قرار داده اند . نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی ، استحکام، عملکرد بهینه و برتری تکنیک AMPC پیشنهادی نسبت به تکنیک کنترل MPC را نشان می‌دهد.

در رفرنس[46] یک روش (LFC) با استفاده از یک مدل داخلی تطبیقی ارائه شده است . در این روش، تکنیک کنترل (MPC) بر روی یک مدل داخلی که به صورت آنلاین به‌روزرسانی می‌شود، استفاده شده است . کنترل مدل داخلی (IMC) به‌عنوان کنترل‌کننده مبتنی بر مدل شناخته شده. IMC می‌تواند از مدل داخلی برای پیش‌بینی خروجی آینده پلنت و همچنین برای اصلاح خروجی استفاده کند. که در آن مدل داخلی MPC به‌صورت آنلاین با استفاده از روش کمترین مربعات به‌روزرسانی می‌شود.روش پیشنهادی با کاهش خطا در شناسایی مدل و مدیریت اغتشاش، بهبود در عملکرد LFC را ایجاد می‌کند. در این روش ترکیب MPC همراه با ظرایب لاگر و به کار گیری موثر از مدل داخلی استفاده شده است تا زمان پاسخ کنترل LFC در جهان واقعی را ، برآورده کند. اثربخشی کنترل پیشنهادی توسط شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک مدل سیستم قدرت سه منطقه‌ای تأیید شده است.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ref | System  Type | Conventional  source | RESs | ESS | Opt | Controller |
| [44] | 1.area | \_ | Wind turbine | \_ | \_ | AMPC\_RPME |
| [45] | Micro gide  2.area | \_ | Wind turbine  PV | FC  BEES | \_ | Adaptive Conventional MPC |
| [46] | 3.area | Syn.generators | \_ | \_ | \_ | Adaptive DMPC |

**2.4 الگوریتم کنترل فازی به همراه الگوریتم های فازی**

منتطق فازی میتواند به عنوان تنظیم پارامتر های کنترل پیشبین به صورت ترکیبی با آن استفاده شود در ادامه آثار شامل منطق فازی ارائه شده است.

در رفرنس[47] یک رویکرد پیش‌بین مدل مبتنی بر منطق فازی ممدانی برای تنظیم فرکانس بار در یک میکروگرید مستقل ارائه شده است میکروگرید AC شامل یک واحد دیزلی و یک سلول سوختی ، انرژی‌های تجدیدپذیر شامل باد و خورشید و سیستم ذخیره ‌سازی باتری است. MPC تطبیقی مورد نظر بر اساس یک رویکرد معمولی است که با یک مکانیزم تنظیم منطق فازی تجهیز شده است. یک منطق فازی مبتنی بر قوانین برای تنظیم وزن های تابع هزینه در کنترل کننده (MPC) مورد استفاده قرار می‌گیرد .برای نشان دادن مزایای MPC تطبیقی فازی، آن را با یک MPC معمولی که وزن‌های تابع هزینه آن به صورت آزمایشی و با استفاده از سعی و خطا انتخاب شده و در طول شبیه‌سازی ثابت است، مقایسه میشود . نتایج نشان می‌دهد که عملکرد پاسخ سیستم حلقه بسته بر اساس MPC فازی پیشنهادی برای سناریوهای مختلف سیستم فرکانس بار در میکروگرید بهبود یافته است.

رفرنس [48]یک رویکرد تطبیقی فازی برای کنترل فرکانس بار در یک شبکه میکروگرید مستقل ارائه می‌دهد. یک کنترل پیش‌بین مدل مرکزی بر اساس منابع انرژی توزیع‌شده شامل واحد دیزل، سلول سوختی، باد، خورشید و ذخیره‌سازی باتری در میکروگرید پیاده‌سازی شده است. کنترل پیشنهادی فازی MPC از یک کنترل‌کننده فازی مبتنی بر قوانین برای فازی ‌سازی پارامتر تنظیم در تابع هزینه MPC استفاده می‌کند که نقش مهمی در کمینه‌سازی انحرافات فرکانسی در سیستم دارد. پاسخ سیستم حلقه بسته‌ای که توسط کنترل پیشنهادی فازی MPC به دست می‌آید، سریعتر و قابل تطبیق برای سناریوهای مختلف در سیستم را دارا میباشد . کارآیی این روش با استفاده از مقدار شاخص عملکرد (ITSE) ارزیابی شده است و با پاسخ کنترل MPC با مقدار تنظیم و همچنین پاسخ کنترل کننده PI مقایسه شده است.

در[49] کنترل LFC یک سیستم قدرت، محدودیت‌های نرخ تولید (GRC) و محدودیت موقعیت شیر گاورنر مشکلات اصلی در طراحی کنترل را ایجاد می‌کنند زیرا به طور قابل توجهی بر پاسخ‌های دینامیکی سیستم تأثیر می‌گذارند و منجر به بزرگ‌تر شدن تخطی و طولانی‌تر شدن زمان نشست می‌شوند. کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) یک استراتژی کنترل جذاب است که به طور سیستماتیک با محدودیت‌ ورودی‌ها، حالت‌ها و خروجی‌های فرایند مورد نظر را مدنظر قرار می‌دهد ودر LFC از آن برای مقابله با مشکل GRC استفاده می‌شود. در این تحقیق مطالعه یک کنترلکننده پیشبین توزیع‌شده (DMPC) برای یک سیستم قدرت هیبرید هیدروترمال چهار منطقه‌ای پیشنهاد شده است. در طرح پیشنهادی، محدودیت موقعیت شیر گاورنر با استفاده از یک مدل فازی مدلسازی شده است و کنترل‌کننده‌های پیش‌بینی محلی به سیستم کنترل غیرخطی وارد می‌شوند.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ref | System  Type | Conventional  source | RESs | ESS | Opt | Controller |
| [47] | Micro gide  1.area | DG | PV  Wind turbine | FC  BESS | \_ | Conventional\_Fuzzy\_MPC |
| [48] | Micro gide  1.area | DG | Wind turbine  PV | FC  BESS | \_ | Conventional\_Fuzzy\_MPC |
| [49] | 4.area | Hydro | \_ | \_ | \_ | Fuzzy DMPC |

**3.4 الگوریتم های فراابتکاری همراه با الگوریتم پیشبین مدل**

در کنترل ‌پیش‌ بین مدل، تنظیم پارامترهای طراحی مؤثر، به عنوان مثال، افق کنترل و پیش‌بینی و همچنین ماتریس‌های وزن ‌بندی ، یک مسئله دشوار و یک نقطه ضعف جدی محسوب می‌شود. در واقع، برای پیاده‌سازی موفق الگوریتم MPC در برنامه‌های عملی، تنظیم مناسب پارامترهای کنترل که عملکرد دینامیک حلقه بسته را مشخص می‌کنند، لازم است. این تنظیم پارامترها، که دشوار و غیرسیستماتیک است، به‌مرور زمان مشکل‌تر و زمان‌برتر می‌شود. روش ها تنظیم شامل روش‌های تنظیم تحلیلی ، محدود‌کننده و/یا زمان بر میباشد ، استفاده از مفاهیم محاسبات نرم، به‌خصوص بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فراابتکاری ، به‌عنوان یک راه‌حل قابل اعتماد برای این نوع مسائل دشوار به نظر می‌رسد. تا به امروز، تعداد کمی از مطالعات پژوهشی با موفقیت بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم های فراابتکاری رویکرد MPC را یکپارچه کرده‌اند. بیشتر این مطالعات از فراابتکاری کلاسیک و قدیمی مانند الگوریتم‌های (GA)،(PSO) ،(ACO) و غیره استفاده می‌کنند. متأسفانه، تمامی این الگوریتم‌ها برای مسائل فرموله شده­ی MPC ، محدودیت‌هایی از نظر همگرایی زودهنگام و ناهمواری مکانیزم استخراج/کاوش را دارند. این محدودیت‌ها تأثیر مستقیم بر کیفیت و بهینگی راه‌ حل‌ های یافت شده دارند. در ادبیات تعداد زیادی از الگوریتم‌های فراابتکاری پیشرفته و پاسخ گلوبال با الگوریتم‌هايی که آسانتر در پیاده‌سازی هستند و دارای تعداد کمتری پارامتر کنترل نسبت به الگوریتم‌های قدیمی هستند، پیشنهاد شده است. مانند الگوریتم های (pPSO) ، الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) ، بهینه‌سازی براساس یادگیری و آموزش (TLBO) و بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) که به دلیل کارائی و دامنه وسیع کاربرد خود، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. که آن‌ها برای حل تنظیم پارامترهای MPC، که به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی محدود فرموله شده است، یک جایگزینی قابل اعتماد برای کاهش پیچیدگی استراتژی MPC را ارائه میدهند[50].

در مرجع[51] نویسندگان یک رویکرد کنترل پیش‌بین مدل مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO-MPC) برای حل مسئله LFC با مشارکت توربین‌های بادی ارائه کرده­اند. مدل MPC کلاسیک برای تنظیم فرکانس سیستم تغییر یافته است و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به مدل کنترولر اضافه شده است. دقت شود در این اثر الگوریتم PSO [[30]](#footnote-30)برای بهینه سازی سیگنال کنترلی در MPC استفاده میشود .همچنین طی شبیه سازی و مقایسه با کنترلر های MPC، PSO-PID و PSO-MPC، نشان داده است ،که استراتژی کنترل PSO-MPC پیشنهادی به طور قابل توجهی پایداری فرکانس سیستم را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، overshoot پاسخ سیستم کاهش یافته و سیستم عملکرد پایدارتری را ارائه میدهد. همچنین استراتژی نام برده شده با مشکلات پاسخ آهسته ، نوسانات بزرگ و تحمل خطای کم مرتبط با روش‌های کنترل سنتی مقابله می‌کند.

در مرجع [52] یک کنترل پیش‌بین مدل بهینه (MPC) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جدید به نام STOA [[31]](#footnote-31)طراحی شده است . کنترل پیشنهادی برای طراحی کنترل فرکانس بار در سیستمهای متصل به هم شامل منابع انرژی تجدیدپذیر (RESs) مختلف استفاده شده است . روش پیشنهادی برای شناسایی پارامترهای بهینه MPC برای کمینه کردن (ITAE[[32]](#footnote-32)) فرکانس و انحرافات Tie\_line تعیین شده است. تجزیه و تحلیل بر روی سه سیستم متصل به هم انجام شده است ، اولین آنها شامل دو واحد حرارتی و PV با ردیابی نقطه توان بیشینه (MPPT) است. مدل ها دیگر شامل سه سیستم چندتایی خطی/غیرخطی با/بدون ذخیره سازی انرژی مغناطیسی فوق رسانا (SMES[[33]](#footnote-33)) است. نتایج به دست آمده توانایی STOA پیشنهادی در طراحی MPC بهینه را نسبت به سایر روش‌ها تأیید می‌کند.

در اثر[53] نویسندگان از کنترل کننده پیش بین مدل در بهبود عملکرد حلقه AVR [[34]](#footnote-34)و LFC استفاده کرده اند ،همچنین وزن‌های کنترل کننده با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی (HHO[[35]](#footnote-35)) تنظیم شده‌اند در ادامه نویسندگان با مقایسه کنترل نام برده با کنترلر های MPC معمولی، PID، FOPID[[36]](#footnote-36)، fuzzy PID، کنترل کننده مشتق دوتایی با فیلتر مشتق گیر و همچنین کنترل کننده پیش بین مدل بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی PSO و الگوریتم سینوسی-کسینوسی برتری کنترل MPC-HHO نسبت به کنترل کننده‌های دیگر مورد بررسی در اثر را نشان داده اند

در این مرجع [54] نویسندگان یک رویکرد بهینه‌سازی فراابتکاری جدید به نام بهینه‌ ساز چند دنیایی (MVO[[37]](#footnote-37)) برای طراحی (LFC) بر مبنای کنترل پیش بین مدل در سیستم‌های چند منطقه‌ای بزرگ متصل به یکدیگر ارائه کرده اند. سیستم ارائه شده شامل مدل حرارتی بازگرم، هیدرو، فتوولتائیک با ردیابی نقطه قدرت بیشینه (MPPT)، توربین بادی (WT)، نیروگاه دیزل (DG) و ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی فوق‌رسانا (SMES) است. عملکرد MPC پیشنهادی بهینه‌سازی شده توسط MVO با MPC طراحی شده توسط روش‌های دیگر مانند روش قطره‌های آب هوشمند (IWD[[38]](#footnote-38)) و الگوریتم ژنتیک (GA) مقایسه شده است . علاوه بر این، مقاومت MPC-LFC پیشنهادی بر اساس MVO با تغییرات پارامترهای سیستم ارائه شده است .

در مرجع [55] نویسندگان یک کنترل برای میکروگریدی شامل منابع تجدیدپذیر پیشنهاد داده اند و پارامترهای وزنی کنترل کننده MPC با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات اذدهام (PSO) بهینه‌سازی شده‌اند همچنین با شبیه سازی نشان داده اند که کنترل کننده پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش کنترل کننده PI-ZN (PI-Ziegler-Nichols)، کنترل کننده‌های مبتنی بر منطق فازی (PI-Fuzzy)، کنترل کننده (FOPID) و مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی (FOPID-CPSO) و کنترل کننده‌های PID مبتنی بر الگوریتم CPSOرا دارد.

در مطالعه[56] از کنترل پیش‌بین مدل بهینه شده با الگوریتم JAYA برای حل مسئله تنظیم فرکانس بار در یک سیستم سه منطقه استفاده شده است .در کنترل برخی از محدودیت‌های فیزیکی استفاده شده در مدل سیستم مانند محدودیت نرخ تولید، باند مرده و تأخیر زمانی توسط گاورنور-توربین، تأثیر منفی بر عملکرد کنترل تکنیک کلاسیک MPC دارند. به همین دلیل در این رفرنس نویسندگان از الگوریتم JAYA برای تنظیم پارامتر های افق پیشبینی و افق کنترل در MPC استفاده کرده اند .

در رفرنس [57]نویسندگان دو الگوریتم الهام گرفته از خفاش (BIA) و الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) را به عنوان دو تکنیک هوش مصنوعی جدید برای تنظیم پارامتر در کنترل کننده پیش‌بین مدل (MPC) همراه با ذخیره انرژی مغناطیسی فوق‌رسانا (SMES) و ذخیره انرژی خازنی (CES) برای کنترل تنظیم بار (LFC) پیشنهاد می‌کند.. روش‌های پیشنهادی بر روی سیستم قدرت غیرخطی سه منطقه‌ای متصل به یکدیگر اعمال می‌شوند تا از انحرافات فرکانس و توان خط در مقابل تحریکات بار به حداقل رسانده شود.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ref | System  Type | Conventional  source | RESs | ESS | Opt | Controller |
| [51] | 1.area | \_ | Wind turbine | \_ | PSO | Conventional MPC \_PSO |
| [52] | 3.area | Hydro  Thermal  DG | PV  Wind turbine | SMES | STOA | Conventional MPC |
| [53] | Multi area | DG | \_ | SMES | HHO | Conventional MPC |
| [54] | Multi area | Thermal  DG  Hydro | Wind turbine  PV | SMES | MVO | Conventional MPC |
| [55] | Micro gide  1.area | DG | Wind turbine  PV  Electrolizer | BEES  FESS  FC | PSO | Conventional MPC –PSO |
| [56] | \_ | Termal | Pv  Wind turbine | \_ | JAYA | Conventional MPC |
| [57] | 3area | Hydro  Boiler | \_ | Smes  Ces | BIA  GSA | Conventional MPC |

**4.4 الگوریتم های دیگر**

در این قسمت به بررسی روش های دیگر تلفیق شده در کنترل پیش بین مدل در آثار پیشین میپردازیم .

رفرنس[58] یک طراحی کنترل تولید خودکار بر اساس کنترل پیش‌ بین مدل هیبریدی برای سیستم قدرت چند منبعی شامل انرژی بادی را ارائه می‌دهد. منابع دیگر شامل آبی و حرارتی نیز در هر منطقه در نظر گرفته شده‌اند وسیستم به صورت یک سیستم دو ناحیه ای مدل شده است . کنترلر AGC پیشنهاد شده برای هر منطقه مستقل و با در نظر گرفتن فقط وضعیت سیستم قدرت محلی طراحی می‌شود .کنترل کننده هیبریدی MPC یک ترکیب از کنترل‌کننده MPC و PID است. ارزیابی عملکرد بین کنترل کننده هیبریدی MPC، MPC سنتی و کنترل کننده AGC سنتی با در نظر گرفتن مشارکت توربین‌های بادی DFIG در شبیه سازی های اثر ارائه شده است و عملکرد برتر کنترل کننده هیبریدی MPC نشان داده شده است.

در مرجع [59] یک طرح کنترل مقاوم برای استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی باتری (BESS[[39]](#footnote-39)) توزیع شده در کنترل فرکانس بار از طریق جمع کننده‌های BESS با شبکه‌های ارتباطی پراکنده ارائه شده است . برای مقابله با عدم قطعیت های مرتبط با عملکرد سیستم، یک کنترل پیش‌بین مدل دو لایه‌ای توسعه داده شده است تا سیگنال‌های کنترلی کارآمدتری برای بهبود پاسخ BESS ها و افزایش مشارکت آن‌ها در LFC ارائه دهد . سپس یک کنترل هماهنگ کننده هوشمند فازی برای هماهنگی BESS و نیروگاه‌ها توسعه داده شده است تا در صورت وجود تاخیرهای طولانی، از تزریق / برداشت اضافی توسط نیروگاه‌ها جلوگیری شود.

در [60] محققان از یک روش کنترل پیش‌بین برای تنظیم نوسان فرکانس سیستم ریزشبکه متصل به شبکه (GCMGS[[40]](#footnote-40)) استفاده کرده­اند. همچنین در این اثر کنترل فرکانس اولیه برای ژنراتور دیزل (DG) و کنترل فرکانس ثانویه با استفاده از (MPC) برای ذخیره انرژی (ES[[41]](#footnote-41)) پیشنهاد شده است. در ادامه نویسنده به طور همزمان، برای کاهش نوسان بار ناشی از سمت تقاضای بار و منابع انرژی تجدیدپذیر، یک طرح تعامل انرژی پویا (DEIS[[42]](#footnote-42)) طراحی کرده است . نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد تنظیم فرکانس استراتژی کنترل فرکانس مبتنی بر MPC بهتر از کنترل PI است و DEIS پیشنهادی می‌تواند نوسان فرکانس سیستم را کاهش دهد.

نویسندگان در مرجع [61] یک فرمولاسیون کنترل بهینه جایگزین MPC برای مسئله LFC ارائه داده اند فرمولاسیون با یک MPC کلاسیک مقایسه شده است . این رویکردها تعادل تقریبی سیستم را در هدف کنترل گنجانده و از یک اختلال جمع شده تخمین زده شده بهره میبرد. فرمولاسیونهای پیشنهادی MPC ممکن است در چارچوب کنترل سلسله مراتبی موجود استفاده شود. نشان داده شده است که فرمولاسیون پیشنهادی مزیت‌هایی نسبت به MPC کلاسیک ارائه نمی‌دهد. با این حال، می‌تواند به عنوان یک جایگزین در نزدیک شدن به مسئله و روش مقایسه فرمولاسیون‌های مختلف کنترل و ویژگی‌های مرتبط در نظر گرفته شود.

در رفرنس[62] ، طراحی و کاربرد کنترل کننده پیش‌بینی مدل به همراه شبکه عصبی (NN-MPC) در سیستم‌های قدرت دو ناحیه ای برای کنترل فرکانس بار ارائه شده است. کنترل کننده پیش‌بینی مدل شبکه عصبی (NN-MPC) پیش‌بینی قابل اعتماد شبکه عصبی را با عملکرد برتر کنترل پیش‌بینی مدل با استفاده از بهینه‌سازی غیرخطی لوونبرگ-مارکواردت غیرخطی ترکیب می‌کند. کنترل‌کننده از انحراف خطای توان حوزه محلی به عنوان سیگنال فیدبک استفاده می‌کند. برای اعتبارسنجی کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی، سیستم قدرت دو حوزه به طور شبیه‌سازی در یک دامنه گسترده از شرایط عملیاتی و تغییرات پارامترهای سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با یک کنترل‌کننده منطق فازی (FLC) از طریق مطالعات شبیه‌سازی مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان دهنده کارایی و برتری روش پیشنهادی در اثر است.

در رفرنس[63] ، نویسندگان یک MPC تطبیقی ارائه و ساختار پیشنهادی را با فرمولاسیون کلاسیک MPC مقایسه کرده‌اند.در این اثر رویکرد تطبیقی تعیین هدف(target-adjusted) به عنوان یک قانون کنترل بهینه مطرح شده . کنترل‌کننده MPC بدست آمده می‌تواند با استفاده از یک سیستم با سه عامل، فرکانس را استوار کند و قادر به پیگیری ورودی مرجع است. در اثر نشان داده شده است که فرمولاسیون پیشنهادی در مقابل MPC کلاسیک مزیتی ندارد. با این حال، می‌توان آن را به عنوان یک جایگزین در رویکرد مسائل و یک روش برای مقایسه فرمولاسیون‌های مختلف کنترل و خصوصیات مرتبط با آن در نظر گرفته شود.

در سیستم‌های قدرت، MPC به گونه‌ای استفاده می‌شود که یک دنباله کنترل بهینه در هر مرحله توسط یک کنترل‌کننده MPC آنلاین ارائه و محاسبه می‌شود. مشکل اصلی آن این است که قبل از اینکه کنترل‌کننده MPC به کار گرفته شود، قانون کنترل قابل ارزیابی نیست. یعنی، قبل از اعمال آن، نمی‌توان دانست که کنترل کننده یک طرح کنترل قابل اجرا یا پایدار برای سیستم دارد یا خیر. برای رفع این محدودیت، روش کنترل مدل پیشبین صریح EMPC معرفی شده و برای به دست آوردن یک قانون کنترل صریح استفاده می‌شود. علاوه بر این، یک الگوریتم تقسیم بندی، بهبود یافته برای EMPC مورد مطالعه قرار گرفته است که امکان توسعه روش EMPC به سیستم با تعداد زیادی متغیر حالت و محدودیت‌های بیشتر را فراهم می‌کند.[64]

در رفرنس[65] نویسندگان برای استحکام فرکانس یک میکروگرید، شارژ/تخلیه دوطرفه و کنترل وضعیت شارژ (SoC) خودروهای الکتریکی هیبریدی را با استفاده از کنترل چند مدل پیش‌بین (MMPC) ارائه داده اند . MPC یک کنترل مؤثر است که با بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مربعاتی بر اساس مدل سیستم، سیگنال‌های کنترلی آینده را محاسبه می‌کند. برای بهبود قدرت مقاومت کنترل‌کننده در برابر عدم قطعیت های سیستم، در این اثر از کنترل چند.مدل پیش‌بین (MMPC) برای کنترل شارژ/تخلیه دوطرفه مبتنی بر وضعیت شارژ (SoC) خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال در پایداری فرکانس میکروگرید استفاده شده است. MMPC نسخه بهبود یافته‌ای از کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل (MPC) اصلی است که برای کار با شرایط عملکرد چندگانه سیستم توسعه یافته است. با بهینه‌سازی سیگنال کنترل توان خودروی الکتریکی در هر لحظه زمانی، و همچنین تغییر MPC توسط SoC باتری خودروی الکتریکی، MMPC پیشنهادی قادر میباشد به طور موثر فرکانس میکروگرید را بهبود دهد.

**5 مقایسه روش های پیشنهاد شده**

نتایج دو بخش قبل نشان میدهد که با توجه به وجود بحران انرژی در سطح جهانی و مسائل زیست محیطی استفاده از سوخت فسیلی کمتر دیده میشود و حجم زیادی از مقالات از انرژی های تجدید پذیر در شبکه های قدرت استفاده کرده اند و همچنین مشاهده میشود که در شبکه های هوشمند و میکروگرید ها این تعداد بیشتر نیز میشود . همچنین با بررسی مقالات ارائه شده دیده میشود که اکثر آثار استراتژی های فراتر از کنترل پیش بین مدل ساده را ترجیح داده اند. دقت شود که با افضایش پیچیدگی ، عدم قطعیت و اندازه سیستم قدرت نیاز به ساختار های متفاوت و همچنین استفاده از الگوریتم های کنترلی دیگر به صورت ادغام شده با mpc ساده نیز بیشتر میشود. الگوریتم های بررسی شده در این تحقیق هرکدام دارای محایب و مزایای خاص خود میباشد استراتژی کنترل پیشبین مرکزی قابلیت استفاده از تجهیزات مرکزی و همچنین اطلاعات کل سیستم را دارا میباشد پس جواب هتری را از نظر کنترل ارائه میکند اما در سیستم ها ی بزرگ نیاز به زیرساخت بزرگ تری از لحاظ سخت افزار دارد. روش غیر مرگزی این مشکل را حل میکند اما به دلیل عدم وجود ارتباط بین واحد های کنترلی سیستم نمیتواند بهترین کنترل را برای هر کدام از واحد ها با توجه به کلیت شبکه ایجاد کند . برای حل این مسئله میتوان از ساخ تار توضیح شده استفاده کرده که همزمان با بهتر شدن سیگنال کنترلی نیاز به ملاحظات مخابراتی و همچنین هزینه ی پیاده سازی بیشتر میشود .

همچنین روش های چون کنترل تطبیقی با MPC و همچنی فازی و الگوریتم های متاهایریستیک هر کدام نیاز به زیر ساخت سخت افزاری بالا و در نتیجه هزینه ی بالا دارد و در پیاده سازی هر کدام اقدامات مربوط به هرکدام از الگوریتم ها باید در نظر گرفته شود خلاصه ی همه مزایا ومعایب در جدول مشاهده میشود .

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| مزایا | معایب | MPCs |
| هزینه ی پیاده سازی کم(در سیستم های کوچیک)  قدرت عملکردی بالاتر | حجم محاسبات بالا درسیستم های بزرگ | Ce\_MPC |
| هزینه ی راه اندازی کم (در مقابل مرکزی برای سیستم های بزرگ)  مناسب برای سیستم های پیچیده | عدم وجود ارتباط بین کنترلر ها | De\_MPC |
| پاسخ بهتر (نسبت به مرکزی و غیر مرکزی)برای سیستم به دلیل ارتباط عامل های کنترلی | نیاز به در نظر گرفتن اقدامات ارتباطی  هزینه ی بالا در پیاده سازی | DMPC |
| استفاده در سیستم­هایLTV  مقاومت در برابر عدم قطعیت ها  توانایی در نظر گرفتن عدم قطعیت ها | حجم محاسبات بالا و پیچیدگی بالا  نیاز به سخت افزار قوی تر | AMPC |
| جواب بهینه تر  تنظیم هوشمند تر کنترلر | نیاز با زمان بیشتر برای محاسبات  نیاز به سخت افزار قوی تر | Meta\_MPC |
| تنظیم هوشمند تر کنترلر | نیاز به تنظیم قواعد  نیاز به سخت افزار بالا | Fuzzy\_mpc |

6 نتیجه گیری

با توجه به نفوذ هرچه بیشتر منابع تولید انرژی تجدیدپذیر و همچنین قدرت گرفتن نمود های نوین شبکه های قدرت مانند شبکه های هوشمند و میکروگرید ها نیاز به کنترل و تنظیم فرکانس سیستم برای جلوگیری از آسیب رسیدن به سیستم بیشتر احساس میشود . در این راستا کنترل پیش بین مدل که بر پایه کنترل بهینه میباشد میتواند با بررسی زمان نمونه برداری حال و پیشبینی رفتار آینده سیستم کنترل فرکانس در شبکه های را انجام دهد. بررسی های انجام شده بر روی آثار شش سال اخیر در ضمینه ی استفاده از کنترل پیشبین مدل در شبکه های قدرت نشان میدهد، که ساختار های کنترل پیش برای سیستم های قدرت پیچیده تر ، برای بدست آورد پاسخ بهتر نیازمند الگو های پیچیده تری میباشد .همچنین بجز مسئله حجم محاسباتی و هزینه ی پیاده سازی ، این کنترل های پاسخ بهتری نسبت به کنترل های کلاسیک و کنترل های کلاسیک مبتنی بر هوش مصنوعی ارائه میدهد

[1]Alhelou, H. H., Hamedani-Golshan, M. E., Zamani, R., Heydarian-Forushani, E., & Siano, P. (2018). Challenges and opportunities of load frequency control in conventional, modern and future smart power systems: A comprehensive review. Energies, 11(10), 2497.

[2] Singh, B., Slowik, A., & Bishnoi, S. K. (2023). Review on Soft Computing-Based Controllers for Frequency Regulation of Diverse Traditional, Hybrid, and Future Power Systems. Energies, 16(4), 1917.

[3] Asghar, R., Riganti Fulginei, F., Wadood, H., & Saeed, S. (2023). A Review of Load Frequency Control Schemes Deployed for Wind-Integrated Power Systems. Sustainability, 15(10), 8380

[4] Pandey, S. K., Mohanty, S. R., & Kishor, N. (2013). A literature survey on load–frequency control for conventional and distribution generation power systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, 318-334.

[5] Sarker, M. A. A., & Hasan, A. K. (2016). Load frequency control in power system. SEU Journal of Science and Engineering, 10(2), 24-30.

[6] A Shankar, R., Pradhan, S. R., Chatterjee, K., & Mandal, R. (2017). A comprehensive state of the art literature survey on LFC mechanism for power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 1185-1207.

[7] Salem, F., & Mosaad, M. I. (2015). A comparison between MPC and optimal PID controllers: Case studies

[8] Behera, N. (2013). Load frequency control of power system (Doctoral dissertation).

[9] Patel, S., Mohanty, B., & Hasanien, H. M. (2020). Competition over resources optimized fuzzy TIDF controller for frequency stabilization of hybrid micro‐grid system. International Transactions on Electrical Energy Systems, 30(9), e12513.

[10] Dashtdar, M., Flah, A., El‐Bayeh, C. Z., Tostado‐Véliz, M., Al Durra, A., Abdel Aleem, S. H., & Ali, Z. M. (2022). Frequency control of the islanded microgrid based on optimised model predictive control by PSO. IET Renewable Power Generation, 16(10), 2088-2100.

[11] Bemporad, A. (2006, December). Model predictive control design: New trends and tools. In Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control (pp. 6678-6683). IEEE.

[12] Wang, L. (2009). Model predictive control system design and implementation using MATLAB®. Springer Science & Business Media.

[13] Uyioghosa, I. E., & Saha, A. K. (2020, January). A comparative analysis of different MPC controllers for load frequency control for interconnected power system. In 2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference (pp. 1-6). IEEE

[14] Kayalvizhi, S., & Kumar, D. V. (2017). Load frequency control of an isolated micro grid using fuzzy adaptive model predictive control. IEEE Access, 5, 16241-16251.

[15] Tripathi, R., Singh, O., & Singh, A. (2020, February). MPC based automatic generation control scheme for power system. In 2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3) (pp. 140-145). IEEE.

[16] Bhagdev, D., Mandal, R., & Chatterjee, K. (2019, March). Study and application of MPC for AGC of two area interconnected thermal-hydro-wind system. In 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT) (Vol. 1, pp. 1-6). IEEE.

[17] Gulzar, M. M., Rizvi, S. T. H., Javed, M. Y., Sibtain, D., & Salah ud Din, R. (2019). Mitigating the load frequency fluctuations of interconnected power systems using model predictive controller. Electronics, 8(2), 156.

[18] Charles, K., Urasaki, N., Senjyu, T., Elsayed Lotfy, M., & Liu, L. (2018). Robust load frequency control schemes in power system using optimized PID and model predictive controllers. Energies, 11(11), 3070.

[19] Yang, J., Sun, X., Liao, K., He, Z., & Cai, L. (2019). Model predictive control‐based load frequency control for power systems with wind‐turbine generators. IET renewable power generation, 13(15), 2871-2879.

[20] Kumar, N., & Singh, A. (2022). Load frequency control for multiarea power system using secondary controllers. Trends in Sciences, 19(2), 2044-2044.

[21] Kunya, A. B., & Argin, M. (2018, February). Model predictive load frequency control of multi-area interconnected power system. In 2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC) (pp. 1-6). IEEE.

[22] Jayachandran, M., & Ravi, G. (2018, February). MPC based secondary control strategy for an islanded AC microgrid under linear loads. In 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES) (pp. 644-651). IEEE.

[23] Pan, J., Yu, S., & Ma, M. (2018, July). Model predictive load frequency control of isolated micro-grid with electrical vehicles. In 2018 37th Chinese Control Conference (CCC) (pp. 3588-3593). IEEE.

[24] Magdy, G., Shabib, G., Elbaset, A. A., & Mitani, Y. (2018). Frequency stabilization of renewable power systems based on MPC with application to the Egyptian Grid. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(28), 280-285.

[25] Kumar, A., Kumari, N., Shankar, G., Elavarasan, R. M., Kumar, S., Srivastava, A. K., & Khan, B. (2022). Load Frequency Control of Distributed Generators Assisted Hybrid Power System Using QOHSA Tuned Model Predictive Control. IEEE Access, 10, 109311-109325.

[26] Liu, L., Kato, T., Mandal, P., Mikhaylov, A., Hemeida, A. M., & Senjyu, T. (2021, August). Multi-area power system load frequency control by using model predictive control by introducing renewable energy sources. In 2021 international conference on science & contemporary technologies (ICSCT) (pp. 1-6). IEEE

[27] Liu, K., Liu, T., & Hill, D. J. (2019, May). Decentralized MPC-Based Frequency Control of Networked Microgrids. In 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia) (pp. 2704-2708). IEEE

[28] Ali, A., Khan, B., Mehmood, C. A., Ullah, Z., Ali, S. M., & Ullah, R. (2017, November). Decentralized MPC based frequency control for smart grid. In 2017 International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE) (pp. 1-6). IEEE.

[29] Othman, A. M., & El‐Fergany, A. A. (2018). Design of robust model predictive controllers for frequency and voltage loops of interconnected power systems including wind farm and energy storage system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *12*(19), 4276-4283.

[30] Pahasa, J., & Ngamroo, I. (2014). Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid. *IEEE Systems Journal*, *10*(1), 97-105.

[31] Oshnoei, A., Khezri, R., & Muyeen, S. M. (2019). Model predictive-based secondary frequency control considering heat pump water heaters. Energies, 12(3), 411.

[32] Liao, X., Liu, K., Qin, L., Wang, N., Ma, Y., Chen, Z., ... & Zhou, Q. (2018, October). Cooperative DMPC-based load frequency control of AC/DC interconnected power system with solar thermal power plant. In 2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) (pp. 341-346). IEEE.

[33] Jia, Y., Dong, Z. Y., Sun, C., & Meng, K. (2019). Cooperation-based distributed economic MPC for economic load dispatch and load frequency control of interconnected power systems. IEEE Transactions on Power Systems, 34(5), 3964-3966.

[34] Chen, M. R., Zeng, G. Q., & Xie, X. Q. (2018). Population extremal optimization-based extended distributed model predictive load frequency control of multi-area interconnected power systems. Journal of the Franklin Institute, 355(17), 8266-8295

[35] Yang, L., Liu, T., & Hill, D. J. (2021). Distributed MPC-based frequency control for multi-area power systems with energy storage. Electric Power Systems Research, 190, 106642.

[36] Asghar, R., Ali, A., Rehman, F., Ullah, R., Ullah, K., Ullah, Z., ... & Khan, B. (2020, January). Load frequency control for EVs based smart grid system using PID and MPC. In 2020 3rd International conference on computing, mathematics and engineering technologies (iCoMET) (pp. 1-6). IEEE.

[37] Ismail, M. M., & Bendary, A. F. (2018). Load frequency control for multi area smart grid based on advanced control techniques. *Alexandria engineering journal*, *57*(4), 4021-4032.

[38] Khan, M., & Sun, H. (2021). Complete provision of MPC-Based LFC by electric vehicles with inertial and droop support from DFIG-Based wind farm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *37*(2), 716-726.

[39] Ma, M., Liu, X., & Zhang, C. (2017). LFC for multi‐area interconnected power system concerning wind turbines based on DMPC. IET Generation, Transmission & Distribution, 11(10), 2689-2696

[40] Shiroei, M., Toulabi, M. R., & Ranjbar, A. M. (2013). Robust multivariable predictive based load frequency control considering generation rate constraint. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 46, 405-413

[41] Vlahakis, E. E., Dritsas, L. D., & Halikias, G. D. (2019). Distributed Model Predictive Load Frequency Control of multi-area Power Grid: A Decoupling Approach. *IFAC-PapersOnLine*, *52*(20), 205-210

[42] Zhang, C., Wang, S., & Zhao, Q. (2021). Distributed economic MPC for LFC of multi-area power system with wind power plants in power market environment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *126*, 106548.

[43] Liu, K., Liu, T., Tang, Z., & Hill, D. J. (2019). Distributed MPC-based frequency control in networked microgrids with voltage constraints. IEEE Transactions on Smart Grid, 10(6), 6343-6354.

[44] Mohamed, M. A., Diab, A. A. Z., Rezk, H., & Jin, T. (2020). A novel adaptive model predictive controller for load frequency control of power systems integrated with DFIG wind turbines. Neural Computing and Applications, 32(11), 7171-7181.

[45] Gbadega, P. A., & Saha, A. K. (2020). Load frequency control of a two-area power system with a stand-alone microgrid based on adaptive model predictive control. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 9(6), 7253-7263.

[46] Rehiara, A. B., Yorino, N., Sasaki, Y., & Zoka, Y. (2019). A novel adaptive LFC based on MPC method. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, *14*(8), 1145-1152.

[47] Akbari, M. S., Safavi, A. A., Vafamand, N., Dragičević, T., & Rodriguez, J. (2020, September). Fuzzy mamdani-based model predictive load frequency control. In 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG) (pp. 7-12). IEEE.

[48] Kayalvizhi, S., & Kumar, D. V. (2017). Load frequency control of an isolated micro grid using fuzzy adaptive model predictive control. IEEE Access, 5, 16241-16251.

[49] Liu, X., Kong, X., & Lee, K. Y. (2016). Distributed model predictive control for load frequency control with dynamic fuzzy valve position modelling for hydro–thermal power system. *IET Control Theory & Applications*, *10*(14), 1653-1664.

[50] Derouiche, M. L., Bouallègue, S., Haggège, J., & Sandou, G. (2019). Advanced Metaheuristics-based Tuning of Effective Design Parameters for Model Predictive Control Approach. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *10*(6).

[51] Fan, W., Hu, Z., & Veerasamy, V. (2022). PSO-Based Model Predictive Control for Load Frequency Regulation with Wind Turbines. Energies, 15(21), 8219.

[52] Ali, H. H., Fathy, A., & Kassem, A. M. (2020). Optimal model predictive control for LFC of multi-interconnected plants comprising renewable energy sources based on recent sooty terns approach. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 42, 100844.

[53] Kumar, V., Sharma, V., & Naresh, R. (2023). HHO-based model predictive controller for combined voltage and frequency control problem including SMES. IETE Journal of Research, 69(5), 2926-2940

[54] Ali, H. H., Kassem, A. M., Al-Dhaifallah, M., & Fathy, A. (2020). Multi-verse optimizer for model predictive load frequency control of hybrid multi-interconnected plants comprising renewable energy. Ieee Access, 8, 114623-114642

[55] Dashtdar, M., Flah, A., El‐Bayeh, C. Z., Tostado‐Véliz, M., Al Durra, A., Abdel Aleem, S. H., & Ali, Z. M. (2022). Frequency control of the islanded microgrid based on optimised model predictive control by PSO. IET Renewable Power Generation, 16(10), 2088-2100.

[56] Gbadega, P. A., & Sun, Y. (2023). Multi-area automatic generation control of a renewable energy-based hybrid power systems using JAYA optimized model predictive control. *Energy Reports*, *9*, 74-84.

[57] Elsisi, M., Aboelela, M., Soliman, M., & Mansour, W. (2018). Design of optimal model predictive controller for LFC of nonlinear multi-area power system with energy storage devices. *Electric Power Components and Systems*, *46*(11-12), 1300-1311.

[58] Hasan, N., Alsaidan, I., Sajid, M., Khatoon, S., & Farooq, S. (2022). Hybrid MPC-Based Automatic Generation Control for Dominant Wind Energy Penetrated Multisource Power System. Modelling and Simulation in Engineering, 2022, 1-10.

[59] Oshnoei, A., Kheradmandi, M., & Muyeen, S. M. (2020). Robust control scheme for distributed battery energy storage systems in load frequency control. IEEE Transactions on Power Systems, 35(6), 4781-4791

[60] Wen, S., Xiong, W., Cao, J., & Qiu, J. (2020). MPC-based frequency control strategy with a dynamic energy interaction scheme for the grid-connected microgrid system. Journal of the Franklin Institute, 357(5), 2736-2751.

[61] Asghar, R., Ali, A., Rehman, F., Ullah, R., Ullah, K., Ullah, Z., ... & Khan, B. (2020, January). Load frequency control for EVs based smart grid system using PID and MPC. In 2020 3rd International conference on computing, mathematics and engineering technologies (iCoMET) (pp. 1-6). IEEE

[62] Kassem, A. M. (2010). Neural predictive controller of a two-area load frequency control for interconnected power system. *Ain Shams Engineering Journal*, *1*(1), 49-58.

[63] Banis, F., Guericke, D., Madsen, H., & Poulsen, N. K. (2020). Load–frequency control in microgrids using target‐adjusted MPC. *IET Renewable Power Generation*, *14*(1), 118-124.

[64] Jiang, H., Lin, J., Song, Y., You, S., & Zong, Y. (2016). Explicit model predictive control applications in power systems: an AGC study for an isolated industrial system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *10*(4), 964-971.

[65] Pahasa, J., & Ngamroo, I. (2014). PHEVs bidirectional charging/discharging and SoC control for microgrid frequency stabilization using multiple MPC. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *6*(2), 526-533.

1. Photovoltic [↑](#footnote-ref-1)
2. Proportional – Integral – Derivative [↑](#footnote-ref-2)
3. Model predictive control [↑](#footnote-ref-3)
4. Micro gide [↑](#footnote-ref-4)
5. Finite impulse response [↑](#footnote-ref-5)
6. Maximum power point [↑](#footnote-ref-6)
7. Frequency response mode [↑](#footnote-ref-7)
8. Generation rate constraint [↑](#footnote-ref-8)
9. Electrical vehicles [↑](#footnote-ref-9)
10. Renewable energy sources [↑](#footnote-ref-10)
11. Photovoltaic [↑](#footnote-ref-11)
12. Wind generator [↑](#footnote-ref-12)
13. Heat Pump Water Heaters [↑](#footnote-ref-13)
14. Cooperative distributed model predictive control [↑](#footnote-ref-14)
15. Wide Area Measurement System [↑](#footnote-ref-15)
16. Non cooperative distributed model predictive control [↑](#footnote-ref-16)
17. Economic model predictive control [↑](#footnote-ref-17)
18. Economic load dispatch [↑](#footnote-ref-18)
19. Population extremal optimization-based extended distributed model predictive [↑](#footnote-ref-19)
20. Smart grid [↑](#footnote-ref-20)
21. Electrical Vehicle [↑](#footnote-ref-21)
22. Centralized- Model-Predictive-Control [↑](#footnote-ref-22)
23. Distributed- Model-Predictive-Control [↑](#footnote-ref-23)
24. Linear parameter varying system [↑](#footnote-ref-24)
25. Adaptive model predictive control [↑](#footnote-ref-25)
26. Recursive polynomial model estimator [↑](#footnote-ref-26)
27. Double fed induction generator [↑](#footnote-ref-27)
28. Reheat turbine. [↑](#footnote-ref-28)
29. Dead band [↑](#footnote-ref-29)
30. Particle swarm optimization [↑](#footnote-ref-30)
31. Sooty terns optimization algorithm [↑](#footnote-ref-31)
32. Integral time absolute error [↑](#footnote-ref-32)
33. Superconducting magnetic energy storage [↑](#footnote-ref-33)
34. Automatic voltage regulator [↑](#footnote-ref-34)
35. Harris Hawks Optimization [↑](#footnote-ref-35)
36. Fractional order PID [↑](#footnote-ref-36)
37. Multi-verse optimizer [↑](#footnote-ref-37)
38. Intelligent waterdrops [↑](#footnote-ref-38)
39. Battey Energy Storage Systems [↑](#footnote-ref-39)
40. Grid-connected microgrid system [↑](#footnote-ref-40)
41. Energy storage [↑](#footnote-ref-41)
42. Dynamic energy interaction schem [↑](#footnote-ref-42)