

طراحی کنترل کننده تحمل پذیر عیب مبتنی بر کنترل پیش بین غیر خطی مقاوم جهت جبران عیب محرک‌ها

رباب ابراهیمی باویلی^۱، محمد جواد خسروجردی^۲

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، r_ebrahimi175@yahoo.com

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، khosrowjerdi@sut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۳/۱۰/۲، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۴/۱/۲۵)

چکیده: این مقاله یک رویکرد جدید جهت طراحی سیستم کنترل کننده تحمل پذیر عیب مبتنی بر کنترل پیش بین غیر خطی مقاوم برای سیستم های چند متغیره غیر خطی افاین ارائه می کند. سیستم کنترل تحمل پذیر عیب مورد نظر از یک رویه تخمین عیب مبتنی بر فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی برای تخمین همزمان حالت های سیستم و ضریب افت کارایی محرک‌ها استفاده می کند. یک واحد ناظر نیز با استفاده از روش مدل سازی عیب و اصلاح مدل به کار رفته در کنترل کننده پیش بین در هر گام نمونه برداری وظیفه جبران عیب افت کارایی و بایاس محرک‌ها را برعهده دارد. همچنین با استفاده از جبران فیدبک در کنترل کننده پیش بین، کنترل کننده مورد نظر در برابر نامعینی های موجود در سیستم، مقاوم می شود. از مزایای مهم این روش، برآورده کردن قیود حاکم بر ورودی های کنترل و جبران همزمان عیب بایاس و افت کارایی محرک‌ها و عملی بودن آن است. نتایج شبیه سازی روش مورد نظر روی سیستم موتور احتراق داخلی خودرو کارایی آن را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: سیستم کنترل تحمل پذیر عیب، کنترل پیش بین مبتنی بر مدل غیر خطی مقاوم، فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی، عیب محرک‌ها.

Robust NMPC- based Fault Tolerant Control Design for Compensation of Actuators Faults

Robab Ebrahimi Bavili, Mohammad Javad Khosrowjerdi

Abstract: This paper presents a new approach for fault tolerant control system (FTCs) design based on robust nonlinear model predictive control (NMPC) for multivariable affine systems. The proposed FTCs uses an estimation scheme that is based on adaptive extended kalman filter (AEKF) for the state estimation of plant and loss of effectiveness factors of actuators. A supervisor module also uses the fault modeling and correction of plant model per sampling time to accommodate bias and loss of effectiveness of actuators. In addition by feedback compensation in NMPC, the proposed controller is robust through plant uncertainties. The most important advantage of the proposed approach is its ability to deal with the constraints and simultaneous fault in actuators and it is practical. Simulation results of the proposed method on automotive engine show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Fault Tolerant Control system, Robust Nonlinear Model Predictive Control, Adaptive Extended Kalman Filter, Actuators Fault.

۱- مقدمه

در سال های اخیر، سیستم های کنترل تحمل پذیر عیب (FTCs)^۱ توجه بسیاری از محققان را در زمینه کنترل فرآیندها به خود جلب نموده است؛ مهمترین علت این امر، افزایش علاقه مندی به ارتقاء عملکرد فرآیندهای صنعتی و نیاز به امنیت و قابلیت اطمینان در سیستم های کنترل است. هدف یک سیستم FTC، نگه داشتن سیستم کنترل در شرایط عملکردی مطلوب و حفظ پایداری آن در هنگام رخداد عیب و خرابی در اجزای مختلف سیستم کنترل می باشد [۱]. سیستم های FTC سنتی از استراتژی های غیرفعال با افزونگی های سخت افزاری یا روش های طراحی مقاوم برای جبران عیوب پیش بینی شده استفاده می کنند. در نقطه مقابل، روش های فعال با استفاده از یک رویه تشخیص و محل یابی عیب (FDI)^۲ با پیکره بندی مجدد کنترل کننده، اثر عیوب را جبران می کنند [۲-۳]. بسته به فرآیند تحت کنترل و شدت عیب، استراتژی FTC مناسب اتخاذ می شود.

امروزه کنترل پیش بین مبتنی بر مدل (MPC)^۳ به عنوان یک استراتژی کنترل استاندارد برای حل مسائل کنترل چندمتغیره با قيود سخت، در فرایندهای صنعتی پذیرفته شده است [۴-۶]. کنترل کننده MPC در هر گام نمونه برداری، از حالت های فعلی فرایند به عنوان شرایط اولیه استفاده می کند و با حل کردن یک مساله کنترل حلقه باز در طول یک افق محدود، توالی کنترل بهینه را محاسبه می کند. سپس اولین جزء این توالی کنترل را به عنوان فرمان کنترل به فرآیند ارسال می کند [۷]. معماری کنترل پیش بین مبتنی بر مدل یک بستر مناسب برای پیاده سازی FTC فراهم می کند و این به دلیل ویژگی گسسته بودن و مبتنی بر مدل بودن آن است. گسسته بودن امکان تغییر مدل و محدودیت ها را در هر گام زمانی فراهم می کند. مبتنی بر مدل بودن نیز، امکان ثبت کردن محدودیت های لازم را جهت جبران عیب ممکن می سازد و آن را به عنوان یک کاندیدای جدی برای سیستم FTC که شامل واحد FDI است، معرفی می کند [۸-۹].

روش های طراحی FTC مبتنی بر MPC مطرح شده در مقالات را می توان به دو نوع روش های غیرفعال و روش های فعال دسته بندی کرد. در روش های غیر فعال عیوب پیش بینی شده از همان ابتدا در طراحی MPC به صورت قیود بیشتر لحاظ می شوند و هیچ اطلاعاتی از عیب در هر گام نمونه برداری برای اصلاح مساله بهینه سازی به کار نمی رود؛ به عنوان مثال می توان به طراحی MPC مبتنی بر حاشیه امنیت سیستم در [۱۰] و طراحی MPC مبتنی بر لیاپانف در [۱۱] اشاره نمود. این روش ها به خاطر حجم بالای محاسبات در کنترل کننده پیش بین به علت قیود اضافه شده و محافظه کار شدن آنها به ازای در نظر گرفتن عیوب بیشتر در طراحی، کارایی و کاربرد گسترده ای ندارند.

در نقطه مقابل، اساس روش های FTC فعال مبتنی بر MPC، بر استفاده کردن از اطلاعات عیب (که در هر گام نمونه برداری توسط واحد FDI بدست می آید) در مساله بهینه سازی MPC استوار است. روش های فعال را می توان در دو نوع کلی دسته بندی نمود: روش هایی که از مدل های چندگانه استفاده می کنند و روش هایی که از اصلاح پارامترهای مساله بهینه سازی در هر گام نمونه برداری استفاده می کنند. در روش استفاده از مدل های چندگانه برای رخداد هر عیب قابل پیش بینی، از قبل کنترل کننده MPC متناسب طراحی می شود. هنگام رخداد عیب، ناظر بر اساس اطلاعات عیب که از واحد FDI دریافت می کند، MPC طراحی شده برای آن عیب را جایگزین MPC پیشین می نماید؛ برای مثال [۱۲] برای سیستم های خطی و [۱۳] برای سیستم های غیرخطی از همین روش استفاده کرده است. مزیت اصلی این روش کم بودن حجم محاسبات روی خط آن و ایراد اصلی آن، مشکلات پیاده سازی آن در عمل است؛ چرا که در عمل امکان رخداد عیوب متعددی با شدت های مختلف وجود دارد و حتی وقوع همزمان آنها نیز ممکن است؛ لذا طراحی کنترل کننده برای هر کدام از سناریوهای مختلف رخداد عیب عملی و معقول نیست؛ البته برای بهبود این وضعیت در [۱۴-۱۶] کاربرد روش های فازی پیشنهاد شده است.

روش دیگر طراحی FTC فعال مبتنی بر MPC استفاده از اصلاح پارامترهای مساله بهینه سازی در هر گام نمونه برداری است. در این روش سیگنال کنترل به صورت روی خط و در هر گام زمانی محاسبه می شود؛ در حین عملکرد سیستم و به محض رخداد عیب، واحد FDI اطلاعات مفیدی مربوط به عیب را فراهم می کند؛ این اطلاعات برای اصلاح پارامترهای مساله بهینه سازی (از جمله مدل فرآیند، قیود روی سیگنال های کنترل و خروجی، تابع هزینه در MPC) به کار می رود و اثر عیب جبران می شود. از جمله کارهایی که در این زمینه انجام شده است، می توان به موارد زیر اشاره کرد: [۱۷] که عیب افت کارایی محرک را با اصلاح مدل خطی فرایند در هر گام نمونه برداری جبران می کند، [۹] و [۱۸] که با روش اصلاح پارامترهای بهینه سازی در سیستم های غیرخطی عیب را جبران می کنند، [۱۹] و [۲۰] که با اصلاح قیود روی متغیر کنترل عیب محرک ها را در سیستم های خطی جبران می نماید و [۲۱] و [۲۲] که با طراحی FTC مبتنی بر MPC های توزیع یافته با اصلاح مدل خطی، عیب محرک ها را در زیر سیستم ها جبران می نماید. مزیت این روش ها عملی بودن آنها و ایراد آنها حجم بالای محاسبات روی خط مربوط به طراحی MPC است.

اکثر مقاله های مرور شده غالباً یک مدل خطی از سیستم تحت کنترل را در نظر گرفته اند و کنترل کننده FTC مبتنی بر کنترل پیش بین خود را بر اساس آن طراحی کرده اند؛ در حالیکه در عمل ما با فرآیند های غیرخطی روبه رو هستیم و استفاده از مدل خطی آنها در طراحی کنترل کننده در اکثر موارد کارایی لازم را ندارد. به همین علت برای دستیابی به کارایی بالاتر، در این مقاله در طراحی کنترل کننده از مدل

¹ Fault Tolerant Control system

² Fault Detection and Isolation

³ Model Predictive Control

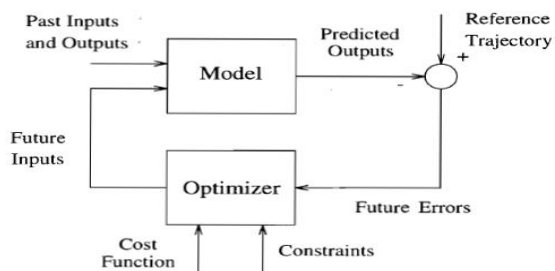
واحد تخمین عیب از یک تکنیک مناسب برای تخمین ضریب افت کارایی محرک‌ها توسط فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی استفاده شده است و در واحد ناظر نیز از مدل‌سازی عیب و اصلاح مدل فرایند استفاده شده است که از نوآوری‌های این مقاله است.

از ویژگی‌های شاخص روش ارائه شده در این مقاله نسبت به روش‌های ارائه شده در کارهای مشابه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) یک مدل غیرخطی از فرآیند در نظر گرفته شده است که کنترل کننده طراحی شده را کارآمدتر کرده است. (۲) برآورده کردن قیود حاکم بر ورودی و جبران عیوب همزمان بایاس و افت کارایی در محرک‌ها که تا به حال در هیچ مقاله‌ای گزارش نشده است. (۳) برخلاف شیوه مرسوم در مقالات مرور شده، که از اصلاح قیود روی سیگنال کنترل برای جبران عیوب محرک‌ها استفاده می‌شود، در این روش به عیوب محرک‌ها بواسطه مدل‌سازی عیب با اصلاح مدل فرآیند رسیدگی می‌شود و این کمک می‌کند که مساله NMPC به یک مساله بهینه سازی با قیود تغییر ناپذیر با زمان تبدیل شود و حجم محاسبات آن کاهش یابد. (۴) عملی بودن و سادگی روش ارائه شده نیز غیر قابل چشم پوشی است.

ساختار مقاله در بخش‌های زیر سازمان دهی شده است؛ در بخش دوم طراحی کنترل کننده NMPC بیان می‌شود. در بخش سوم نحوه طراحی تخمینگر همزمان عیب و حالت و در بخش چهارم طراحی واحد ناظر مطرح می‌شود. در بخش پنجم نیز یک الگوریتم کلی برای طراحی کنترل کننده FTC مبتنی بر NMPC موردنظر بیان می‌شود. نتایج حاصل از شبیه سازی اعمال کنترل کننده موردنظر روی سیستم موتور احتراق داخلی خودرو در بخش شش نشان داده شده اند. در نهایت جمع بندی نتایج بدست آمده در مقاله و پیشنهادهایی جهت ادامه پژوهش در بخش هفتم آورده شده اند.

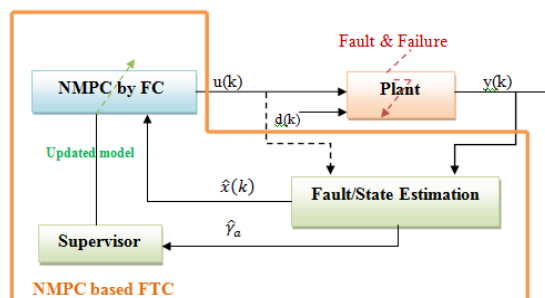
۲- طراحی NMPC مقاوم

کنترل کننده MPC از یک مدل پیش بین که از روی مدل فرایند ساخته می‌شود و یک پردازنده که عمل بهینه سازی را با در نظر گرفتن قیود انجام می‌دهد، تشکیل یافته است. ساختمان اساسی MPC در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۴].



شکل ۲: ساختمان اساسی MPC.

غیرخطی افاین سیستم که یک مدل فراگیر می‌باشد، استفاده شده است. هدف اصلی این مقاله، طراحی یک روش FTC مبتنی بر کنترل پیش بین مبتنی بر مدل غیرخطی (NMPC)^۱ مقاوم برای فرآیندهای غیرخطی افاین با استفاده از اصلاح پارامترهای مساله بهینه سازی NMPC می‌باشد؛ به طوریکه حجم محاسبات آن به گونه ای باشد که در عمل قابل پیاده سازی باشد و توانایی جبران عیب همزمان بایاس و افت کارایی در محرک‌ها را داشته باشد. ساختار کلی روش مورد نظر در شکل (۱) آورده شده است؛ در این شکل $y(k)$ ، $u(k)$ و $d(k)$ به ترتیب خروجی، ورودی و اغتشاش وارد به فرآیند می‌باشند و $\hat{x}(k)$ و \hat{p}_a به ترتیب تخمین متغیرهای حالت و ضریب افت کارایی محرک‌ها می‌باشند.



شکل ۱: ساختار کلی FTC فعال مبتنی بر NMPC پیشنهاد شده برای جبران عیوب محرک‌ها.

با توجه به شکل ۱، ساختار کنترل کننده پیشنهاد شده از سه واحد تشکیل شده است: تخمینگر همزمان عیب-حالت، ناظر و کنترل کننده NMPC. شیوه عملکرد آن به این صورت است که در هر گام نمونه برداری، واحد تخمین همزمان عیب و حالت، متغیرهای حالت $(\hat{x}(k))$ و اطلاعات مربوط به عیب افت کارایی رخ داده در محرک‌ها (\hat{p}_a) را تخمین می‌زند و به ترتیب در اختیار NMPC و ناظر قرار می‌دهد؛ ناظر پس از دریافت این اطلاعات، با مدل سازی عیب رخ داده، مدل فرایند را اصلاح می‌نماید و به NMPC ارسال می‌کند و در نهایت کنترل کننده NMPC با دریافت این ورودی‌ها، مدل پیش بین خود را اصلاح می‌کند؛ به این ترتیب اثر عیوب افت کارایی در محرک‌ها طی یک رویه فعال جبران می‌شود.

همچنین ترتیبی داده شده است که سیستم کنترل در برابر عیب بایاس محرک‌ها و نامعینی‌های موجود مقاوم باشد؛ به این صورت که با اصلاح فرمول بندی NMPC عیب بایاس و با افزودن روش جبران فیدبک (FC)^۲ به آن، اثر نامعینی‌ها برطرف می‌شود.

در طراحی NMPC از روش ارائه شده در [۲۳] استفاده شده است که ویژگی بارز آن حجم محاسبات کمتر می‌باشد، به طوریکه قابل انجام توسط یک کامپیوتر صنعتی ساده باشد و فرمول بندی آن به گونه ای اصلاح شده است که قابلیت جبران اغتشاش را نیز داشته باشد. در طراحی

¹ Nonlinear Model Predictive Control

² Feedback Compensation

و f و g توابع غیرخطی می باشند. پیش بینی یک گام متغیرهای حالت در طول افق پیش بینی N_p می تواند از روابط زیر بدست آید:

$$\hat{x}(k+1|k) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) + g_d(x(k))d(k) \quad (3)$$

$$\hat{x}(k+j|k) = f(\hat{x}(k+j-1|k)) + g(\hat{x}(k+j-1|k))u(k+j-1|k) + g_d(\hat{x}(k+j-1|k))d(k+j-1|k); \quad (4)$$

$$j = 2, 3, \dots, N_p$$

چون $\hat{x}(k+j-1|k)$ شامل تابع غیرخطی از داده های پیشین است، ممکن است برای پیش بینی بیش از یک گام، رابطه (۴) راه حل تحلیلی ارائه ندهد و برای f و g غیرخطی شدید شکل فوق دستیابی به $u(k+1)$ و المان های آینده ورودی را به صورت تحلیلی، ناممکن سازد؛ به همین خاطر با تقریب زدن آینده متغیرهای حالت با اجزای مسیر مرجع آنها، می توان پیش بینی یک گام را برای $j \geq 2$ به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\hat{x}(k+j|k) = f(w_x(k+j-1|k)) + g(w_x(k+j-1|k))u(k+j-1|k) + g_d(w_x(k+j-1|k))d(k+j-1|k) \quad (5)$$

که در آن w_x مسیر مرجع حالت‌های می باشد که اجزای آن از رابطه زیر حاصل می شوند:

$$w_x(k+j|k) = \alpha w_x(k+j-1|k) + (1-\alpha)x_{sp}; \quad (6)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_p - 1$$

که در آن $\alpha \in [0,1]$ ضریب نرم کردن، $w_x(k|k) = x(k)$ و مقدار مطلوب متغیرهای حالت است. به این ترتیب مدل پیش بین متغیرهای حالت فرایند غیرخطی افاین به صورت زیر قابل بیان است:

$$\hat{x}(k+1|k) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) + g_d(x(k))d(k) \quad (7)$$

$$\hat{x}(k+j|k) = f(w_x(k+j-1|k)) + g(w_x(k+j-1|k))u(k+j-1|k) + g_d(w_x(k+j-1|k))d(k+j-1|k); \quad (8)$$

$$j = 2, 3, \dots, N_p$$

در ادامه برای کم کردن بار محاسبات بهینه سازی غیرخطی، استراتژی کنترل پلکانی در فرمول بندی NMPC به کار برده می شود؛ ابتدا نموکنترل در گام k ام را به صورت $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ تعریف می کنیم. طبق استراتژی کنترل پلکانی، نمو ورودی کنترل در آینده می تواند به صورت زیر اتخاذ شود:

$$\Delta u(k+j|k) = \beta \Delta u(k+j-1|k) = \beta^j \Delta u(k) = \beta^j \Delta; \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_p - 1$$

که در آن β یک عدد حقیقی مثبت قابل تنظیم است و ثابت پله نامیده می شود. با به کار بردن این استراتژی در NMPC، به جای محاسبه توالی کنترل $[\Delta u(k) \dots \Delta u(k+N_p-1|k)]$ که N_p متغیر مستقل

استراتژی MPC به این صورت است که در هر گام نمونه برداری ابتدا با استفاده از مدل پیش بین فرآیند، خروجی فرایند در طول افق پیش بینی N_p ، پیش بینی می شود. سپس از کمینه کردن تابع هزینه (که اغلب از مجموع مربعات خطای پیش بینی و مربعات سیگنال کنترل یا تغییرات آن تشکیل یافته است) با در نظر گرفتن قیود، توالی فرمان های کنترل در طول افق کنترل بدست می آید. سپس طبق اصل کنترل افق محدود (RHC)^۱ اولین جزء از این توالی به عنوان سیگنال کنترل در زمان k به فرآیند اعمال می شود و بقیه توالی نادیده گرفته می شود. برای زمان $k+1$ دوباره این مراحل تکرار می شوند [۲۴].

کنترل کننده MPC به صورت گسترده در فرایندهای صنعتی مورد پذیرش قرار گرفته است، اما برای فرایندهای با غیرخطیگی های بالا کارایی لازم را ندارد؛ به همین علت در دهه اخیر NMPC مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال، کارهایی در این زمینه در [۲۵] و [۲۶] انجام گرفته است که اغلب روی مشخصه های تئوریک مثل پایداری، مقاومت و غیره تمرکز دارد و روش حل مساله و حجم محاسبات در آنها نادیده گرفته شده است؛ در حالیکه همین مساله یکی از مشکلات بسیار جدی در پیاده سازی عملی NMPC می باشد.

در حالت کلی چون یک راه حل تحلیلی دقیق برای اکثر مسائل برنامه ریزی غیرخطی وجود ندارد، اغلب از روش های عددی مثل برنامه ریزی مربعی متوالی (SQP)^۲ برای مثال در [۲۷] یا الگوریتم ژنتیک (GA)^۳ در [۲۸] استفاده شده است. اما بار محاسباتی NMPC با استفاده از این روش های عددی خیلی بیشتر از آن است که قابل انجام توسط کامپیوترهای صنعتی باشد. البته یک روش NMPC نوین با یک راه حل تحلیلی در [۲۳] برای سیستم های غیر خطی افاین مطرح شده است که با استفاده از پیش بینی های یک گام متوالی به جای پیش بینی های چندگام انجام می پذیرد و حجم محاسبات در این روش خیلی کمتر از روش های پیشین می باشد. در این مقاله نیز از همین روش استفاده شده است و فرمول بندی آن به گونه ای اصلاح شده است که اثراغتشاش را نیز جبران کند و همچنین روش جبران فیدبک نیز به آن اضافه شده است.

۲-۱- فرمول بندی NMPC

سیستم نامتغیر بازمان، گسسته و غیرخطی افاین را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) + g_d(x(k))d(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

که در آن $x(k) \in X \subseteq R^n, u(k) \in U \subseteq R^m$ و $d(k)$ و $y(k)$ به ترتیب متغیر ورودی کنترل، حالت، اغتشاش معلوم و خروجی هستند

¹ Receding Horizon Control

² Sequential Quadratic Programming

³ Genetic Algorithm

$$\hat{X}_k = X_k^1 + S_k \cdot \Delta U_k = X_k^1 + \bar{S}_k \cdot \Delta \quad (14)$$

$$\hat{Y}_k = C \hat{X}_k = C(X_k^1 + \bar{S}_k \cdot \Delta) \quad (15)$$

در ادامه برای حالت تک ورودی- تک خروجی تابع هزینه ای به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$J_k = (\hat{Y}_k - W_{yk})^T Q (\hat{Y}_k - W_{yk}) + \Delta U_k^T R \Delta U_k \quad (16)$$

که در آن Q و R ماتریس های وزنی مناسب اند و W_{yk} برداری به صورت

$$W_{yk} = \begin{bmatrix} w_y(k+1|k) \\ w_y(k+2|k) \\ \vdots \\ w_y(k+N_p|k) \end{bmatrix}$$

می باشد که حاوی اجزای مسیر مرجع حالتی است که به عنوان خروجی سیستم می باشد. با جاگذاری (۱۵) در (۱۶) و کمینه سازی تابع هزینه فوق در حالت نامقید ($\frac{\partial J_k}{\partial \Delta} = 0, \frac{\partial^2 J_k}{\partial \Delta^2} > 0$)، نمو کنترل بهینه از رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta = \frac{\bar{S}_k^T C^T Q (W_{yk} - C X_k^1)}{\bar{S}_k^T C^T Q C \bar{S}_k + 0.5 R(1+\beta^2+\dots+\beta^{2(N_p-1)})} \quad (17)$$

در حالت کنترل مقید برای اینکه قیود هم برآورده شوند، از روش لاگراژ برای لحاظ کردن قیود در طراحی قانون کنترل استفاده می کنیم. ابتدا فرض می کنیم که هر قید حاکم روی ورودی کنترل یا حالت‌ها می تواند به فرم خطی $a_i^T \Delta \leq b_i; i = 1, 2, \dots, p$ نوشته شود که در آن p تعداد قیود را مشخص می کند. فرم ماتریسی همه قیود را می توان به صورت زیر نوشت:

$$A \Delta \leq B \quad (18)$$

که در آن $A = [a_1^T \ a_2^T \ \dots \ a_p^T]^T$ و $B = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_p]^T$. با انتخاب تابع لاگراژ به صورت

$$L_k(\lambda_i) = J_k + \lambda_i^T (a_i^T \Delta - b_i); \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (19)$$

و مساوی صفر قرار دادن مشتقات جزئی آن نسبت به پارامترهای تصمیم λ_i و Δ داریم:

$$\Delta = \frac{\bar{S}_k^T C^T Q (W_{yk} - C X_k^1) - 0.5 \lambda_i^T a_i^T}{\bar{S}_k^T C^T Q C \bar{S}_k + 0.5 R(1+\beta^2+\dots+\beta^{2(N_p-1)})} \quad (20)$$

$$\lambda_i^T = \frac{a_i^T \bar{S}_k^T C^T Q (W_{yk} - C X_k^1)}{0.5 a_i^T a_i} - \frac{b_i (\bar{S}_k^T C^T Q C \bar{S}_k + 0.5 R(1+\beta^2+\dots+\beta^{2(N_p-1)}))}{0.5 a_i^T a_i} \quad (21)$$

اگر در رابطه (۲۱)، $\lambda_i \leq 0$ ، به این معنی است که قید متناظر تاثیری روی Δ نداشته و ما می توانیم $\bar{\lambda}_i = 0$ انتخاب کنیم، اما اگر $\lambda_i > 0$ باشد قید متناظر روی Δ تاثیر گذارده و بایستی $\bar{\lambda}_i = \lambda_i$ انتخاب شود، در نهایت راه حل NMPC در حالت مقید به صورت زیر است:

دارد، فقط کافیست که اولین جزء آن یعنی $\Delta u(k)$ محاسبه شود؛ به این ترتیب حجم محاسبات NMPC به شدت کاهش می یابد.

با توجه به اینکه [۲۳]

$$u(k+j-1|k) = u(k-1) + \sum_{i=0}^{j-1} \Delta u(k+i|k) \quad (10)$$

و با به کارگیری (۹)، رابطه (۸) به صورت زیر تبدیل می شود:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+j|k) &= f(w_x(k+j-1|k)) \\ &+ g(w_x(k+j-1|k))(u(k-1) + \sum_{i=0}^{j-1} \beta^i \Delta) \\ &+ g_d(w_x(k+j-1|k)) d(k+j-1|k) \\ &= f(w_x(k+j-1|k)) \\ &+ g(w_x(k+j-1|k)).u(k-1) \\ &+ g_d(w_x(k+j-1|k)) d(k+j-1|k) \\ &+ g(w_x(k+j-1|k)).\sum_{i=0}^{j-1} \beta^i \Delta \\ &= \hat{x}^1(k+j|k) \\ &+ g(w_x(k+j-1|k)).\sum_{i=0}^{j-1} \beta^i \Delta \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \hat{x}^1(k+j|k) &= f(w_x(k+j-1|k)) \\ &+ g(w_x(k+j-1|k)).u(k-1) \\ &+ g_d(w_x(k+j-1|k)) d(k+j-1|k) \end{aligned} \quad (12)$$

توجه کنید که اندازه سیگنال اغتشاش در آینده نامعلوم است و حداکثر اطلاعاتی که از آن در دسترس است، اندازه آن در زمان حال است؛ اما می توان از برونیابی برای تقریب آینده آن استفاده نمود [۲۹]. با استفاده از برونیابی مرتبه صفر، $d(k+j-1|k)$ را با $d(k-1)$ تقریب زده می شود. به این ترتیب در رابطه (۱۱)، $\hat{x}^1(k+j|k)$ فقط شامل داده های معلوم در زمان k می باشد و جمله دوم از نمو ورودی در زمان های آینده تشکیل شده است. پس با این رابطه، داده های نامعلوم به صورت خطی جدا شدند و راه حل تحلیلی برای Δ می تواند بدست آید. برای بیان کردن پیش بینی ها در طول $j = 1, 2, \dots, N_p$ به شکل ماتریسی، بردارها و ماتریس هایی به صورت زیر قابل تعریف می باشند:

$$\bar{X}_k = \begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{x}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+N_p|k) \end{bmatrix}; \quad X_k^1 = \begin{bmatrix} \hat{x}^1(k+1|k) \\ \hat{x}^1(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{x}^1(k+N_p|k) \end{bmatrix}$$

$$\Delta U_k = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \\ \beta \Delta \\ \vdots \\ \beta^{N_p-1} \Delta \end{bmatrix}$$

$$S_k = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ s_2 & s_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_p & s_p & \dots & s_p \end{bmatrix}; \quad s_j = g(w_x(k+j-1|k));$$

$$S_k \cdot \Delta U_k = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2(1+\beta) \\ \vdots \\ s_p(1+\beta+\dots+\beta^{N_p-1}) \end{bmatrix} \Delta = \bar{S}_k \cdot \Delta \quad (13)$$

پیش بینی حالت ها و خروجی ها به صورت زیر قابل بیان است:

۳- طراحی تخمینگر همزمان عیب و حالت

همانطور که در مقدمه گفته شد، در این مقاله برای جبران عیب افت کارایی در محرک‌ها از یک روش FTC فعال مبتنی بر NMPC استفاده خواهد شد. برای تکمیل هر رویه فعال، طراحی واحد FDI ضروری است. در این بخش روشی برای تخمین ضریب افت کارایی محرک‌ها (γ_{ai}) ارائه می‌شود؛ در این روش ضریب افت کارایی محرک‌ها را مانند بردار ورودی ناشناخته به فرآیند مدل نموده و با ثابت فرض نمودن دینامیک آنها سیستم افزوده را تشکیل داده و با طراحی یک فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی برای سیستم افزوده شده هم متغیرهای حالت فرایند تحت کنترل و هم ضریب افت کارایی را تخمین می‌زنیم. در این بخش در قسمت اول، نحوه نمایش انواع عیب در محرک‌ها بیان می‌شود. در قسمت دوم نحوه تخمین ضرایب افت کارایی محرک‌ها توضیح داده می‌شود و معادلات کلی AEKF در قسمت سوم مطرح می‌شود.

۳-۱- نمایش انواع عیب در محرک‌ها

در حین عملکرد سیستم کنترل، ممکن است در اجزای آن از جمله محرک‌ها، سنسورها یا حتی خود فرایند تحت کنترل، عیب و خرابی‌هایی رخ دهد؛ اغلب این عیوب به صورت جمعی یا ضربی یا عیب در مدل فرآیند قابل بیان کردن می‌باشند.

عیب در محرک‌ها به دو صورت افت کارایی و بایاس رخ می‌دهد؛ منظور از افت کارایی محرک حالتی است که محرک نمی‌تواند حداکثر توان سیگنال کنترل را به فرایند اعمال کند. بایاس محرک نیز مقداری است که محرک روی سیگنال کنترل در حالت بی عیب اضافه یا کم می‌کند و به فرآیند اعمال می‌کند. سیگنال کنترل پس از رخداد عیب در هر محرک را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$u_{fi} = (1 + \gamma_{ai})u_i + u_{f_{oi}} ; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad -1 \leq \gamma_{ai} \leq 0 \quad (26)$$

که m تعداد محرک‌هاست و γ_{ai} ضریب افت کارایی محرک نام است. در رابطه فوق جمله اول که بیانگر عیب افت کارایی محرک است، عیب ضربی و جمله دوم که بیانگر عیب بایاس است، عیب جمعی نامیده می‌شود. بسته به مقادیر γ_{ai} و $u_{f_{oi}}$ ، سناریوهای مختلف رخداد عیب در محرک نام در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱: سناریوهای مختلف عیب در محرک نام

بایاس	بایاس	
	$u_{f_{oi}} = 0$	$u_{f_{oi}} \neq 0$
ضریب افت کارایی		
$\gamma_{ai} = 0$	سالم	بایاس
$-1 < \gamma_{ai} < 0$	افت کارایی	افت کارایی و بایاس
$\gamma_{ai} = -1$	خرابی	گیر کردن

می‌توان عیب تمام محرک‌ها را به فرم بسته زیر نشان داد:

$$u_f = (I + \gamma_a)u + u_{f_0} \quad (27)$$

$$\Delta = \frac{\bar{S}_k^T C^T Q (W_{yk} - C X_k) - 0.5 A^T \bar{\lambda}}{\bar{S}_k^T C^T Q C \bar{S}_k + 0.5 R (1 + \beta^2 + \dots + \beta^{2(N_P-1)})} \quad (22)$$

$$\bar{\lambda} = [\bar{\lambda}_1 \quad \bar{\lambda}_2 \quad \dots \quad \bar{\lambda}_p]^T$$

نکته ۱: فرمول بندی NMPC مطرح شده در این بخش به سادگی قابل تعمیم به حالت چند ورودی-چند خروجی می‌باشد.

۲-۲- جبران فیدبک

اغلب، مدلی که از فرایند تحت کنترل در دست ماست، دارای نامعینی‌هایی می‌باشد. نامعینی‌ها باعث به وجود آمدن ناهماهنگی بین فرایند و مدل آن می‌شود. طبق قضیه مطرح شده در [۲۳]، زمانیکه ناهماهنگی‌ای بین فرایند و مدلی که خروجی از روی آن پیش بینی می‌شود وجود داشته باشد، خطای حالت ماندگار خروجی مخالف صفر می‌شود. برای صفر کردن خطای حالت ماندگار می‌توان از روش جبران فیدبک استفاده کرد. برای این کار خطای پیش بینی $e(k)$ در زمان k به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k|k-1) \quad (23)$$

که در آن $\hat{x}(k|k-1)$ مقدار پیش بینی شده $x(k)$ در زمان $k-1$ می‌باشد. به طریق مشابه

$$e(k+j|k) = x(k+j) - \hat{x}(k+j|k) \quad (24)$$

سپس $e(k+j|k)$ را به مقدار پیش بینی شده $x(k+j)$ در زمان $k+j$ اضافه می‌کنیم، بنابراین رابطه (۱۲) به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

$$\hat{x}^1(k+j|k) = f(w_x(k+j-1|k)) + g(w_x(k+j-1|k)).u(k-1) + g_a(w_x(k+j-1|k)).d(k+j-1|k) + e(k+j|k) \quad (25)$$

که با استفاده از برونیابی مرتبه صفر $e(k+j|k) = e(k)$ و $d(k+j-1|k) = d(k-1)$ می‌باشد. با استفاده از روش جبران فیدبک، سیستم کنترل در برابر نامعینی‌های فرآیند مقاوم می‌شود و خطای حالت ماندگاری وجود نخواهد داشت. همچنین چون در روش NMPC چندگام مطرح شده، پیش بینی‌های تقریبی وجود دارد که ممکن است باعث بعضی کم‌دقتی‌ها شود، روش جبران فیدبک اشاره شده در بالا در هر گام نمونه برداری خطا را قبل از انباشته شدن حذف خواهد کرد، تا موثر بودن الگوریتم حفظ شود.

به این ترتیب با استفاده از یک سری پیش بینی‌های تقریبی یک گام به جای پیش بینی‌های چندگام سنتی، NMPC چندگام منجر به یک نتیجه تحلیلی برای کنترل غیرخطی سیستم افاین شد. استفاده از استراتژی کنترل پلکانی منجر به بار محاسباتی کمتر شد و جبران فیدبک، مقاومت سیستم کنترل را در برابر نامعینی‌های موجود افزایش داد.

و متغیرهای حالت آن شامل متغیرهای حالت فرآیند و ضریب افت کارایی محرک‌ها است. با طراحی یک تخمینگر حالت برای سیستم افزوده شده، هم متغیرهای حالت و هم اندازه ضریب افت عملکرد محرک‌ها تخمین زده می‌شود. معادلات کلی تخمینگر حالت AEKF در قسمت بعدی آورده شده است.

تکته ۲: وجود جمله $w(k)$ در رابطه (۳۱) تا حد قابل قبولی امکان تغییرات سریع را به ضریب عیب عملگر داده است؛ به همین علت حساسیت روش نسبت به این تغییرات کم می‌باشد. به هر حال برای کمتر کردن حساسیت روش مورد نظر نسبت به ضریب عیب عملگر وقتی که دارای تغییرات سریع در حوزه زمان می‌باشد، می‌توان دینامیکی به صورت در نظر گرفت:

$$\gamma_a(k+1) = A \gamma_a(k) + w(k)$$

البته در این حالت لازم است ماتریس A معلوم باشد.

تکته ۳: اگر عیب بایاس محرک‌ها نیز نامعلوم باشد، می‌توان به طریق مشابه عیب بایاس محرک‌ها را تخمین زد. در این حالت کفایت که $u_{f_0}(k)$ به عنوان حالت جدید به سیستم دچار عیب بایاس شده افزوده گردد.

۳-۳- فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی

در بین روش‌های مختلف FDI مبتنی بر مدل موجود، انواع فیلترهای کالمن کاربرد وسیع تری دارند. فیلتر AEKF شکل اصلاح شده ای از EKF است که مشکل نبود تضمین همگرایی آن نسبت به تغییر یا نامعینی در کواریانس خطای رویتگر (r) را ندارد؛ فرمول بندی AEKF که در [۱۸] برای سیستم‌های غیرخطی کلی مطرح شده است، به صورت کلی در ادامه آمده است.

معادلات حالت و خروجی سیستم غیرخطی کلی را به شکل زیر در نظر می‌گیریم:

$$x(k) = L(x(k-1), \xi(k), v(k)) + w(k-1) \quad (34)$$

$$y(k) = C x(k) + v(k) \quad (35)$$

که در آن L یک تابع غیرخطی و $\xi(k)$ بردار حاوی تمامی ورودی‌های معلوم به سیستم است و $w(k)$ و $v(k)$ به ترتیب توالی نویزهای سفید گوسی ناهم‌بسته با میانگین صفر و کواریانس q و r می‌باشند. در AEKF توالی به روز رسانی یا مانده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta(k) = y(k) - C \hat{x}(k) \quad (36)$$

با جایگذاری معادله خروجی در (۳۶) داریم:

$$\eta(k) = (C x(k) + v(k)) - C \hat{x}(k) = C[x(k) - \hat{x}(k)] + v(k) \quad (37)$$

همچنین داریم:

که $\gamma_a = \text{diag}(\gamma_{a1}, \gamma_{a2}, \dots, \gamma_{am})$ یک ماتریس قطری با ابعاد $m \times m$ می‌باشد و I ماتریس واحد با همان اندازه است و بردار u_{f_0} که هم بعد u می‌باشد، حاوی عیب بایاس محرک‌ها است:

$$u_{f_0} = [u_{f_{01}} \ u_{f_{02}} \ \dots \ u_{f_{0m}}]^T$$

۲-۳- تخمین ضریب افت کارایی محرک‌ها

مدل فضای حالت فرآیند غیرخطی افاین در حالت رخداد عیب در محرک با معادلات زیر توصیف می‌شود:

$$x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k)) u_f(k) + g_a(x(k)) d(k) \quad (28)$$

$$y(k) = C x(k) \quad (29)$$

با توجه به (۲۷)، می‌توان معادله حالت سیستم در هنگام رخداد عیب در محرک‌ها به صورت زیر بدست آورد:

$$x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k)) u(k) + E(k) \gamma_a(k) + g_a(x(k)) d(k) + g(x(k)) u_{f_0}(k) \quad (30)$$

که در آن

$$E(k) = g(x(k)) U(k), \gamma_a(k) = \begin{bmatrix} \gamma_{a1}(k) \\ \gamma_{a2}(k) \\ \vdots \\ \gamma_{am}(k) \end{bmatrix}$$

$$U(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_2(k) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & u_m(k) \end{bmatrix}$$

و $d(k)$ و $u_{f_0}(k)$ ورودی‌های معلوم می‌باشند. با فرض اینکه ضریب افت عملکرد محرک‌ها نامعلوم اما ثابت باشد یا دارای تغییرات کند در طول زمان باشد، می‌توان دینامیک ضریب افت عملکرد محرک‌ها را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\gamma_a(k+1) = \gamma_a(k) + w(k) \quad (31)$$

که $w(k)$ توالی نویز سفید گوسی با میانگین صفر و کواریانس q است. با کنار هم قرار دادن دینامیک‌های (۳۰) و (۳۱) و با تعریف بردار حالت جدیدی به صورت $z_a(k) = [x(k) \ \gamma_a(k)]^T$ سیستم افزوده شده به صورت زیر بدست می‌آید:

$$z_a(k+1) = \bar{f}(z_a(k)) + \bar{g}(z_a(k)) u(k) + \bar{g}_d(z_a(k)) d(k) + \bar{g}(z_a(k)) u_{f_0}(k) + B_w w(k) \quad (32)$$

$$y(k) = \bar{C}_a z_a(k) \quad (33)$$

که در آن

$$\bar{f}(z_a(k)) = \begin{bmatrix} f(x(k)) + E(k) \gamma_a(k) \\ \gamma_a(k) \end{bmatrix}$$

$$\bar{g}(z_a(k)) = \begin{bmatrix} g(x(k)) \\ 0 \end{bmatrix}; \bar{g}_d(z_a(k)) = \begin{bmatrix} g_d(x(k)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}; \bar{C}_a = [C \ 0]$$

۴- واحد ناظر

با توجه به شکل ۱، ناظر واحدی است که اطلاعات عیب را از واحد تخمین عیب دریافت می‌کند و برای جبران عیب، با مدل سازی عیب، مدل اصلاح شده فرآیند را برای به روز رسانی مدل پیش بین فرآیند در کنترل کننده NMPC تولید می‌کند. نحوه مدل سازی انواع عیب محرک-ها و اصلاح مدل فرآیند برای جبران هر کدام از آنها در واحد ناظر، در ادامه تبیین شده است.

مدل فضای حالت فرآیند را در حالت بدون عیب که با معادلات (۱) و (۲) توصیف شده‌اند، را در نظر می‌گیریم. زمانیکه در محرک عیب رخ می‌دهد، برای اصلاح مدل فرآیند، کفایت u_f بیان شده در رابطه (۲۷) جایگزین u در رابطه (۱) شود، در این حالت داریم:

$$x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))(I + \gamma_a)u(k) + g(x(k))u_{f_0}(k) + g_a(x(k))d(k) \quad (46)$$

با تعریف $g(x(k))_{new} = g(x(k))(I + \gamma_a)$ داریم:

$$x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))_{new}u(k) + g(x(k))u_{f_0}(k) + g_a(x(k))d(k) \quad (47)$$

برای جبران اثر عیب افت کارایی محرک‌ها کفایت که پس از دریافت اطلاعات γ_a (ها γ_{ai}) از واحد تخمین عیب، $g(x(k))_{new}$ ساخته شود و به NMPC ارسال گردد.

برای جبران عیب بایاس محرک‌ها نیز، جمله $g(x(k))u_{f_0}(k)$ را همانند اغتشاش $g_a(x(k))d(k)$ به مدل پیش بین NMPC اضافه کرده و از آن در طراحی استفاده خواهیم نمود. در این حالت می‌توان هر دو ورودی بایاس و اغتشاش معلوم را به صورت بسته در یک بردار جمع کرد و مساله NMPC را برای سیستم افاین به شکل زیر حل نمود:

$$x(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) + \bar{g}_a(x(k))\bar{d}(k) \quad (48)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (49)$$

که در آن

$$\bar{g}_a(x(k)) = [g_a(x(k)) \quad g(x(k))]$$

$$\bar{d}(k) = [d(k) \quad u_{f_0}(k)]^T$$

به این ترتیب در هر گام نمونه برداری پس از دریافت اطلاعات عیب از واحد تخمین عیب، ناظر ماتریس $g(x(k))_{new}$ را ایجاد می‌کند و مدل به روز شده در NMPC به کار می‌رود و اثر عیوب محرک‌ها، جبران می‌شود.

۵- الگوریتم طراحی FTC مبتنی بر NMPC

در این بخش بر اساس بخش‌های پیشین، یک الگوریتم کلی برای طراحی کنترل کننده FTC مبتنی بر NMPC برای سیستم‌های غیر خطی افاین بیان می‌کنیم. فرض می‌کنیم تعداد عیب یا خرابی‌های رخ داده به صورت همزمان کوچکتر یا مساوی تعداد خروجی‌های قابل اندازه گیری

$$e(k)^- \cong x(k) - \hat{x}(k)^- \quad (38)$$

$$P(k)^- = E[e(k)^- e(k)^-{}^T] \quad (39)$$

$$r(k) = E[v(k)v(k)^T] \quad (40)$$

تحت برقراری شرایط تعامد بین خطای رویتگر و خطای تخمین حالت‌ها، کواریانس به روز رسانی می‌تواند از رابطه (۴۱) محاسبه شود.

$$E[\eta(k)\eta(k)^T] = E[(C e(k)^-)(C e(k)^-)^T] + E[v(k)v(k)^T] \quad (41)$$

با جاگذاری (۳۹) و (۴۰) در (۴۱) داریم:

$$E[\eta(k)\eta(k)^T] = s(k) = C P(k)^- C^T + r(k) \quad (42)$$

زمانیکه کواریانس به روز رسانی $E[\eta(k)\eta(k)^T]$ در دسترس باشد، کواریانس خطای رویتگر $r(k)$ می‌تواند از (۴۲) محاسبه شود. برای محاسبه کواریانس مانده $E[\eta(k)\eta(k)^T]$ نیز می‌توان از تعداد محدودی از نمونه‌های توالی به روز رسانی استفاده کرد:

$$E[\eta(k)\eta(k)^T] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \eta(k-m)\eta(k-m)^T \quad (43)$$

که در نهایت منجر می‌شود به

$$r_a(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \eta(k-m)\eta(k-m)^T - C P(k)^- C^T \quad (44)$$

که M اندازه پنجره تخمین را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که رابطه (۴۳) زمانی نتیجه مفیدی می‌دهد که توالی به روز رسانی در طول گام‌های نمونه M ایستا و ارگادیک^۱ باشد.

نکته ۴: سیستم افاین توصیف شده با (۳۲) و (۳۳) حالت خاصی از سیستم غیرخطی کلی است که در (۳۴) و (۳۵) بیان شده است؛ در این حالت $\xi(k) = [u(k) \quad d(k) \quad u_{f_0}(k)]^T$ می‌باشد و در عمل برای جلوگیری از واگرا شدن AEKF ناشی از نبود نویز اندازه گیری، معادله خروجی (۳۳) به صورت زیر به کار برده می‌شود:

$$y(k) = \tilde{C}_a z_a(k) + v(k) \quad (45)$$

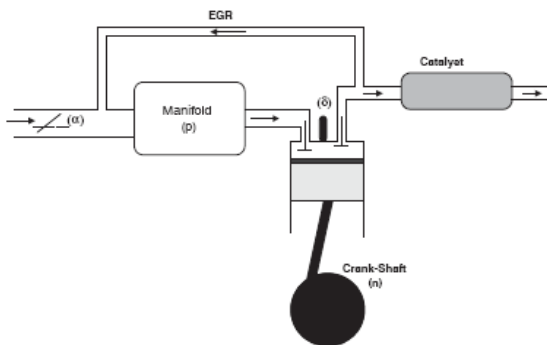
که در آن نویز اندازه گیری $v(k)$ توالی نویز سفید گوسی با میانگین صفر و کواریانس r است.

لازم به ذکر است که در عمل ما اطلاعاتی از ماتریس کواریانس نویز فرآیند (q) و ماتریس نویز اندازه گیری (r) که سیستم راتحت تاثیر قرار می‌دهند، نداریم. بلکه در حین طراحی فیلتر از آنها به عنوان پارامترهای تنظیم برای همگرا کردن یا دستیابی به عملکرد بهتر فیلتر AEKF استفاده می‌شود که با سعی و خطا انجام می‌شود.

¹ ergodic

خروجی های مهم موتور، فشار محفظه مانیفولد p بر حسب kPa و دور موتور n بر حسب rpm می باشد.

شکل ۴: شمای ساده شده موتور احتراق داخلی خودرو.



می توان مدل غیر خطی موتور را با معادلاتی به صورت زیر توصیف

نمود [۳۰]:

$$\begin{cases} \dot{n} = k_n(T_i - T_L), & k_n = 42.40 \mp 5 \\ \dot{p} = k_p(\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}), & k_p = 54.26 \mp 7 \end{cases} \quad (50)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ai} &= (1 + 0.907 \alpha + 0.099 \alpha^2) g(p) \\ \dot{m}_{ao} &= -0.00059 n - 0.133 p + 0.00053 n p \\ &\quad + 0.0000017 n p^2 \\ T_i &= -39.22 + \frac{2708 \dot{m}_{ao}}{n} - 0.0112 \delta^2 + 0.635 \delta \\ &\quad + (0.0216 + 0.00067 \delta) n \left(\frac{2\pi}{60}\right) \\ &\quad - 0.0001 n^2 \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 \\ T_L &= \left(\frac{n}{263.17}\right)^2 + T_a = T_{L1} + T_a \end{aligned}$$

$$g(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } p < 50.66625 \\ 0.0197 (101.32 p - p^2)^{1/2} & \text{if } p \geq 50.662 \end{cases}$$

در این مدل، T_a بیانگر گشتاور اغتشاشی اعمال شده به موتور بر حسب Nm است. پارامترهای ثابت موجود در مدل برای یک موتور ۴ سیلندر-۱٫۶ لیتر با سوخت تزریقی است. فرض می کنیم که $\delta = ۱۵$ درجه تنظیم شده است. هدف نگه داشتن سرعت خودرو در سرعت ایده آل ۷۵۰ دور در دقیقه و دفع اغتشاش وارد شده بر آن توسط سیستم خنک کننده خودرو با کنترل زاویه دریچه گاز α می باشد.

با در نظر گرفتن $a = 1 + 0.907 \alpha + 0.099 \alpha^2$ می توان مدل

فرایند را به صورت افاین زیر نوشت:

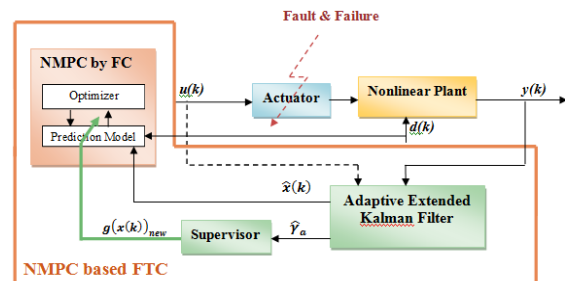
$$\begin{bmatrix} \dot{n} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n(T_i - T_{L1}) \\ -k_p \dot{m}_{ao} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_p g(p) \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} -k_n \\ 0 \end{bmatrix} T_a \quad (51)$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} n \\ p \end{bmatrix} \quad (52)$$

برای طراحی کنترل کننده، سیستم را با زمان نمونه برداری ۰٫۰۵ ثانیه گسسته می نمایم و یک کنترل کننده NMPC برای سیستم موتور خودرو طراحی می کنیم و عملکرد آن را در مواجه با اغتشاش بررسی می کنیم. با تنظیم پارامترهای طراحی در حالت مقید به صورت $\alpha = ۰٫۲$ و

فرایند تحت کنترل باشد و اغتشاش وارده به فرایند را معلوم فرض می کنیم. برای طراحی کنترل کننده مورد نظر گام های زیر را دنبال می کنیم.

- مدل غیرخطی افاین سیستم مورد نظر را بدست می آوریم.
 - برای حالت بدون عیب، کنترل کننده NMPC طراحی می کنیم و روش جبران فیدبک را نیز به آن اضافه می کنیم.
 - واحد تخمین عیب را توسط AEKF تشکیل می دهیم و واحد ناظر را نیز طراحی می کنیم و همگی را در حلقه کنترل قرار می دهیم.
- شماتیک کلی روش مورد نظر در شکل ۳ آمده است.



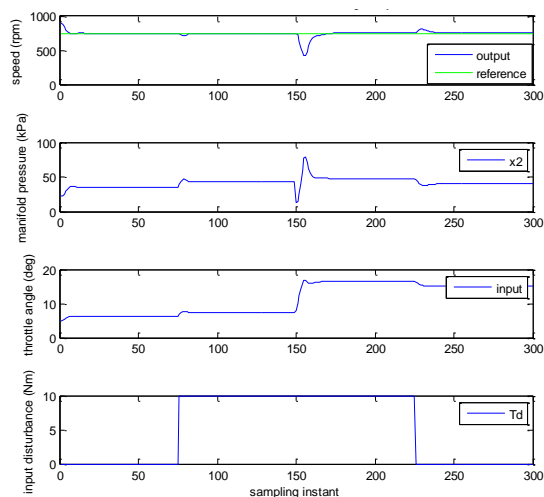
شکل ۳: ساختار کنترل کننده FTC مبتنی بر NMPC برای جبران عیب محرک‌ها در سیستم های غیرخطی افاین.

با توجه به شکل فوق، شیوه عملکرد کنترل کننده طراحی شده به این صورت می باشد که در هر گام نمونه برداری، واحد تخمین همزمان عیب و حالت، از روی اطلاعات سیگنال کنترل و خروجی فرایند، تخمین ضریب افت کارایی محرک‌ها و متغیرهای حالت فرایند را توسط AEKF فراهم می کند و آنها را به ترتیب به ناظر و کنترل کننده NMPC ارسال می نماید. ناظر با در یافت اطلاعات مربوط به ضریب افت کارایی محرک‌ها با مدل سازی عیوب رخ داده مدل فرایند را اصلاح می کند و به کنترل کننده NMPC ارسال می کند. کنترل کننده NMPC با دریافت این ورودی ها مدل پیش بین خود را به روز می نماید و مساله بهینه سازی جدید را حل می نماید. به این ترتیب اثر عیب افت کارایی محرک‌ها به صورت فعال طی چرخه واحد تخمین عیب، ناظر و کنترل کننده NMPC جبران می شود. همچنین به خاطر استفاده از جبران فیدبک در NMPC کنترل کننده طراحی شده نسبت به نامعینی های موجود در آن مقاوم می شود.

۶- نتایج شبیه سازی

در این بخش به ارزیابی عملکرد کنترل کننده مطرح شده در این مقاله روی سیستم موتور احتراق داخلی خودرو که یک سیستم با غیرخطینگی های شدید است، می پردازیم.

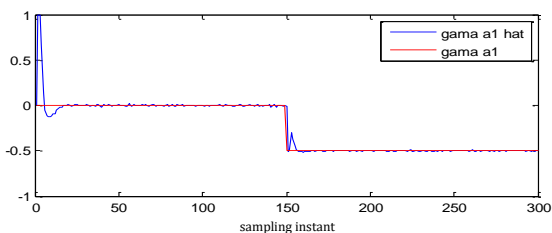
شکل ۴ شمای ساده ای از یک موتور احتراق داخلی خودرو را نشان می دهد؛ همانطوریکه مشاهده می کنیم این فرایند یک فرایند دو ورودی- دو خروجی است. ورودی های کنترل موتور به ترتیب زاویه دریچه گاز α ($۳۵ \leq \alpha \leq ۵$) و زاویه جرکه زنی δ ($۴۵ \leq \delta \leq ۱۰$) بر حسب درجه و



(ب)

شکل ۶: کنترل سیستم موتور احتراق داخلی خودرو در مواجهه با رخداد عیب در محرک دریچه گاز (آ) با کنترل کننده NMPC (ب) با کنترل کننده FTC مبتنی بر NMPC.

با توجه به شکل ۶-آ پس از رخداد عیب در دریچه گاز، خروجی دچار خطای حالت ماندگار می شود؛ البته همانطور که مشاهده می کنیم پس از رخداد عیب، NMPC بی تفاوت نبوده و با افزایش دامنه سیگنال کنترل تا حدودی سعی در جبران عیوب داشته است؛ علت این امر را می توان، خاصیت نسبی کنترل پیش بین در تحمل کردن عیب دانست (برای توضیح بیشتر به [۳۱] رجوع شود). در ادامه با استفاده از کنترل کننده FTC مبتنی بر NMPC در شکل ۶-ب اثر عیوب به صورت کامل جبران شده است. شکل ۷ نیز اطلاعات عیب رخ داده در این حالت را که توسط واحد تخمین عیب، تخمین زده شده اند، نشان می دهد.

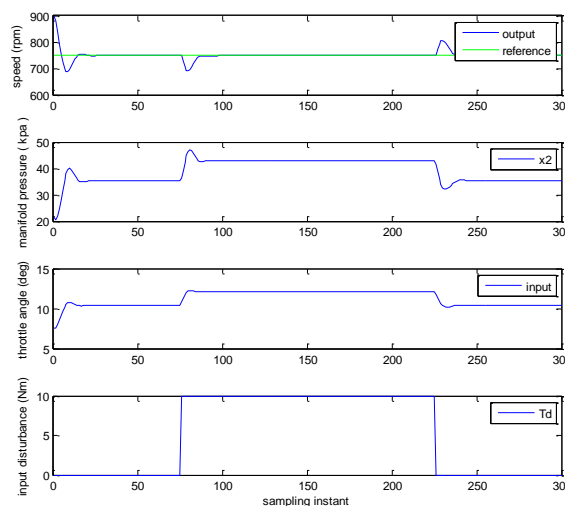


شکل ۷: تخمین ضریب افت کارایی محرک توسط واحد تخمین عیب در سیستم موتور احتراق داخلی خودرو

۷- نتیجه گیری

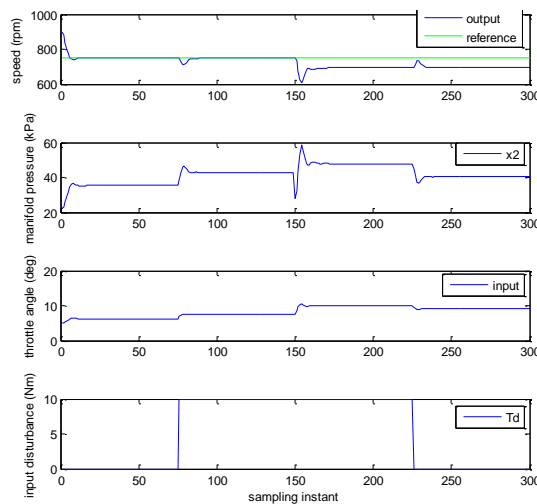
در این مقاله یک رویه کنترل مقید و تحمل پذیر عیب در قالب کنترل کننده FTC مبتنی بر NMPC مقاوم برای سیستم های چندمتغیره غیرخطی افاین ارائه شد که توانایی جبران عیوب همزمان بایاس و افت کارایی رخ داده در محرک ها را ایجاد نمود. در واقع کنترل کننده ارائه شده از یک رویه فعال برای جبران عیب افت کارایی محرک ها استفاده نمود. همچنین با اصلاح فرمول بندی NMPC و افزودن روش جبران فیدبک به آن کنترل کننده در برابر عیب بایاس محرک ها و نامعینی های

ارائه می دهد که در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل اهداف کنترلی و قیود به خوبی برآورده شده اند.



شکل ۵: کنترل سیستم موتور احتراق داخلی خودرو با NMPC

در ادامه به طراحی FTC مبتنی بر NMPC برای سیستم موتور احتراق داخلی خودرو می پردازیم و عملکرد آن را به ازای رخداد عیب در محرک دریچه گاز بررسی می کنیم؛ برای مثال فرض می کنیم در گام ۱۵۰ محرک دریچه گاز دچار عیب بایاس $\alpha_0 = -6$ درجه شود و کارایی آن ۵۰ درصد افت کند. نتیجه رخداد این عیوب و نحوه اصلاح آن توسط کنترل کننده FTC مبتنی بر NMPC در شکل ۶ نشان داده شده است.



(آ)

- [9] D. A. Joosten et al, "Fault-tolerant control using dynamic inversion and model-predictive control applied to an aerospace benchmark," International Federation of Automatic Control (IFAC), 2008.
- [10] M. Abdel- Geliel, E. Badreddin and A. Gambier, "Application of model predictive control for fault tolerant System using dynamic safety margin," IEEE, American Control Conference (ACC), pp. 5493-54-98, 2006.
- [11] M. Mahmood and P. Mhaskar, "Lyapunov-based model predictive control of stochastic nonlinear systems," Automatica, vol. 48, no. 9, pp. 2271-2276, 2012.
- [12] S. Kanthalakshmi and V. Manikandan, "Fault tolerant control design for simultaneous actuator and sensor faults using multiple MPCs," IEEE Process Automation, Control and Computing, pp. 1- 6, 2011.
- [13] S.M. Kargar, K. Salahshoor and M.J. Yazdanpanah, "Integrated nonlinear model predictive fault tolerant control and multiple model based fault detection and diagnosis," Chemical Engineering Research and Design, 2013.
- [14] A. Ichtev, J. Hellendoorn, R. Babuika and S. Molloy, "Fault-tolerant model-based predictive control using multiple takagi-sugeno fuzzy models," IEEE Proceeding of the International Conference on Fuzzy Systems, vol. 1, pp. 346-351, 2002.
- [15] L. F. Mendonça, J. M. C. Sousa and J.M.G. Sá da Costa, "Fault-tolerant control using a fuzzy predictive approach," Expert Systems with Applications, vol. 39, no. 12, pp. 106368-106381, 2012.
- [16] D. Chilin et al, "Detection, isolation and handling of actuator faults in distributed model predictive control systems," Journal of Process Control, Vol. 20, No. 9, pp. 1059-1075, 2010.
- [17] S. Qi Sun, L. Dong and L. Li Shu Sheng Gu, "Fault tolerant control for constrained linear systems based on MPC and FDI," International Journal of Information and System Sciences, Vol. 4, No. 4, pp. 512-523, 2008.
- [18] K. Salahshoor, S. Salehi and V. Mohammadnia, "A new Fault tolerant nonlinear model predictive controller based on an adaptive extended kalman filter," IEEE Advanced Computer Control (ACC), Vol. 2, pp. 593-597, 2010.
- [19] C. Martínez, V. Puig, J. Quevedo and A. Ingimundarson, "Fault tolerant model predictive control applied on the barcelona sewer network," IEEE Conference on decision and control, pp. 1349-1354, 2005.
- موجود مقاوم شد. مزیت اصلی این رویه FTC، قابلیت رسیدگی به قیود روی ورودی (برای مثال قیود لازم برای جلوگیری از اشباع محرک‌ها) و عیب محرک‌ها به صورت همزمان در سیستم‌های غیرخطی است؛ چرا که در کنترل صنعتی هم قیود وجود دارد و هم رخداد عیب اجتناب ناپذیر است. همچنین حجم محاسبات آن به خاطر حجم کمتر محاسبات NMPC و اصلاح عیب محرک‌ها بواسطه اصلاح مدل فرایند و نه قیود، نسبت به سایر کارهای انجام یافته در این زمینه کمتر است. نتایج شبیه سازی روی سیستم موتور احتراق داخلی خودرو، کارایی روش ارائه شده را به خوبی نشان داده است. ادامه منطقی این پژوهش را می‌توان در تعمیم روش به کار گرفته شده برای جبران عیب در سنسورها و خود فرآیند تحت کنترل و پیاده سازی روش ارائه شده در سیستم‌های عملی دانست.

مراجع

- [1] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control system," Annual Reviews in Control, vol. 32, pp. 229-252, 2008.
- [2] J. Jiang and X. Yu, "Fault tolerant control systems: a comparative study between active and passive approaches," Annual Reviews in Control, vol. 36, no. 1, pp. 60-72, 2012.
- [3] A. Mirzaee and K. Salahshoor, "Fault diagnosis and accommodation of nonlinear systems based on multiple model adaptive unscented kalman filter and switched MPC and H-infinity loop shaping controller," Journal of Process Control, vol. 22, no. 3, pp 626-634, 2012.
- [4] A. Gambier et al, "Fault tolerant control of a small reverse osmosis desalination plant with Feed water bypass," American control conference (ACC), 2010.
- [5] J. Prakash, S. C. Patwardhan, S. L. Shah, "Design and implementation fault tolerant model Predictive Control scheme on a simulated model of a three-tank hybrid system" IEEE Conference on control and fault tolerant systems, pp. 173-178, 2010.
- [6] V. Puig, Di. Feroldi, M. Serra, J. Quevedo and J. Riera, "Fault-tolerant MPC control of PEM fuel cells," International Federation of Automatic Control (IFAC), pp. 11112-11117, 2008.
- [7] T. van den Boom and A. Stoorvogel. *Model Predictive Control*, CRC Press, 2010.
- [8] E. F. Camacho, T. Alamo and D.M. Dela Pena, "Fault tolerant model predictive control," IEEE Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 1- 8, 2010.

- [26] M.Cannon, "Efficient nonlinear model predictive control algorithms," Annual Reviews in Control, vol. 28, no. 2, pp. 229–237, 2004.
- [27] H. J. Ferreau, G. Lorini, M. Diehl, "Fast nonlinear model predictive control of gasoline engines," IEEE International Conference on Control Applications, pp. 2754-2759, 2006.
- [28] U. Yuzgec, Y. Becerikli and M. Turker, "Nonlinear predictive control of a drying process using genetic algorithms" ISA Transactions, vol. 45, no. 4, pp. 589- 602, 2006.
- [29] T. van den Boom and A. Stoorvogel. *Model Predictive Control*, CRC Press, 2010.
- [30] G.Vachtsevanos, S.S. Farinwata and D.K. Pirovolou, "Fuzzy Logic Control of an Automotive Engine," IEEE Control Systems, vol. 13, no. 3, pp 62-68, 1993.
- [31] J. M. Maciejowski, "The implicit daisy-chaining property of constrained predictive control," Applied Mathematics and Computer Science, 1998.
- [20] E. N. Hartley and J. M. Maciejowski, "Reconfigurable predictive control for redundantly actuated systems with parameterised input constraints," Systems & Control Letters, pp. 8-15,2014.
- [21] K. Menighed, J-J. Yame, C. Aubrun and B. Boussaid, "Fault tolerant cooperative control: a distributed model predictive control approach," IEEE Conference on Control and Automation, pp. 1094-109, 2011.
- [22] D. Chilin, J. Liu, X. Chen and D. Christofides, "Fault detection and isolation and fault tolerant control of a catalytic alkylation of benzene process," Chemical Engineering Science, vol. 78, pp. 155-166, 2012.
- [23] T. Zheng and W. Chen. *Efficient Nonlinear Model Predictive Control for Affine System*, InTech Europe, 2011.
- [24] E. F. Camacho and C. Bordons. *Model predictive Control*, Springer, 2004.
- [25] S. J.Qin and T. A Badgwell, "A survey of industrial model predictive control technology," Control Engineering Practice, vol. 11, no. 7, pp 733–764, 2003.