

توسعه پایشگر ترکیبی مرحله‌ای-PID الگو محور برای پایش دور موتور احتراق داخلی در ناحیه دور آرام

ساسان بنارضایی^{۱*}، مجید شالچیان^۲

^۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، sasan.rezaie@gmail.com

^۲ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، shalchian@aut.ac.ir

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۴۸۳۳۹۴۰۰

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱ اسفند ۱۳۹۳

پذیرش: ۳۰ شهریور ۱۳۹۴

کلیدواژه‌ها:

موتور احتراق داخلی

الگوی موتور

پایش دور آرام

پایشگر مرحله‌ای

پایشگر PID

در این مقاله، پایشگر ترکیبی مرحله‌ای-PID برای پایش دور موتور احتراق داخلی خودرو در شرایط دور آرام با هدف دستیابی به عملکرد مناسب موتور و کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی ارائه شده است. برای استفاده از رویکرد پایش مبتنی بر شبیه‌سازی، ابتدا شبیه‌سازی موتور در شرایط دور آرام توسعه داده شده است. این شبیه‌سازی علامت فرمان دریچه‌ هوای کنارگذر و زاویه جرقه را به عنوان ورودی از واحد الکترونیکی خودرو دریافت می‌کند و دور موتور متناظر با آن را محاسبه می‌کند. ارزیابی رفتار شبیه‌سازی، با استفاده از داده‌های موتور بنزینی XU7-1761cc انجام شده است. میانگین خطای الگوی توسعه یافته ۲,۳۳٪ و حداکثر خطای آن ۸٪ است. پایش دور آرام موتور توسط دو پایشگر مرحله‌ای و مرحله‌ای-PID انجام می‌شود. دو خروجی اصلی پایش، زاویه جرقه و مقدار بازشدگی دریچه‌ هوای کنارگذر اند. پایش دور تحت اعمال بارهای برهم زننده خارجی از جمله سامانه خنک‌کننده، فرمان و مولد برق شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پایشگر طراحی شده عملکرد مناسب و مقاومی در مقابل بارهای خارجی دارد و به کاهش مصرف سوخت در شرایط دور آرام به مقدار ۱۴,۴٪ نسبت به پایشگر feedback-feedforward پیاده‌سازی شده در واحد پایش برقی خودرو منجر می‌گردد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، صنایع خودروسازی تحقیقات وسیعی در زمینه کاربرد روش‌های پایش پیشرفته به منظور کاهش گازهای آلاینده ناشی از موتورهای داخلی، صرفه‌جویی در مصرف سوخت و افزایش کارایی خودروها انجام داده‌اند که این تحقیقات هم‌اکنون به طور مستمر ادامه دارد [۱-۳].

پایش موتور احتراق داخلی در شرایط دور آرام، یکی از پرچالش‌ترین جنبه‌ها در زمینه پایش موتور خودرو است. تحت این شرایط رفتار موتور غیرخطی و متغیر با زمان بوده و دارای دینامیک پیچیده‌ای است.

از آنجایی که در شرایط دور آرام بار روی موتور بسیار کم و عمدتاً ناشی از اصطکاک است، دور موتور می‌تواند ناپایدار شود. کاهش دور از یک طرف، ممکن است منجر به خاموش شدن موتور و افزایش دور از طرف دیگر باعث افزایش مصرف سوخت و آلاینده‌ای می‌گردد.

ضمن آنکه تأثیر ناگهانی بارهای اضافی مانند خنک‌کن و دینام می‌تواند باعث اختلال و تغییر ناگهانی دور موتور گردد. نظر به روند رو به رشد ترافیک و افزایش زمان کارکرد موتورها در حالت دور آرام، پایش رفتار موتور در این حالت اهمیت می‌یابد [۴].

تحقیقات نشان داده است که با پایش جریان هوای ورودی به موتور خودرو و زاویه جرقه، می‌توان مقدار مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها را تا حد قابل قبولی کاهش داد. ورودی‌های مذکور، دو علامت مهم به منظور پایش دور موتور در حالت دور آرام است.

به طور کلی ورودی زاویه جرقه سرعت تأثیر شدیدی نسبت به ورودی فرمان دریچه هوا دارد [۵] و رایانه خودرو علاوه بر ورودی دریچه هوا، از ورودی زاویه جرقه در لحظاتی که دور موتور به صورت ناگهانی تغییر می‌کند، به منظور جلوگیری از افت ناگهانی دور موتور و خاموش شدن آن استفاده می‌کند.

البته می‌توان از ورودی‌های دیگری نیز به منظور پایش دقیق‌تر، خصوصاً در شرایط گذرا استفاده نمود. مثلاً ورودی مقدار پاشش سوخت نیز تأثیر زیادی روی دور موتور دارد [۶].

از آنجایی که تثبیت نسبت هوا به سوخت ورودی به منظور عملکرد بهینه واکنشگر و کاهش مؤثر مقدار آلاینده‌ها همواره به عنوان هدف کلیدی راهبرد پایش مورد نظر است، لازم است مقدار پاشش سوخت متناسب با جریان هوای ورودی به استوانه تنظیم شود. لذا از این ورودی برای پایش دور موتور استفاده نمی‌شود و مقدار آن بر اساس جریان هوای ورودی تعیین می‌گردد.

در موتور الگو^۱ شده توسط نیکولا و همکاران [۷] از دریچه هوای برقی استفاده شده است. علامت‌های زاویه دریچه هوا و زاویه جرقه، ورودی‌های الگو هستند و حداکثر خطای آن حدود ۷٪ است.

خطای مذکور در لحظاتی که دور موتور تغییر ناگهانی دارد اتفاق می‌افتد و نشان‌دهنده این موضوع است که الگو، عکس‌العمل سریعی نسبت به تغییرات ندارد.

چو و همکاران [۸] الگویی برای موتور با دریچه برقی ارائه داده‌اند. الگوی مذکور برای تمام حالت‌های کارکرد موتور ارائه شده است و سه علامت فرمان دریچه هوای برقی، زاویه جرقه و مقدار پاشش، به عنوان ورودی لحاظ شده است. این الگو در دور موتور بیشتر از ۲۰۰۰rpm دارای بیشترین خطای ۲۰٪ است.

در الگوی قبلی ارائه شده توسط ما [۹] فقط علامت فرمان دریچه هوای کنارگذر به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است و از سایر ورودی‌ها نظیر زاویه جرقه صرف‌نظر شده است.

همچنین اثر بازده حجمی و گشتاور اصطکاک لحاظ نشده است. حداکثر خطا در مرجع مذکور برابر ۱۲٪ است. در این مقاله به منظور افزایش دقت الگو، ورودی جرقه نیز در الگو اضافه شد و اثر بازده حجمی و گشتاور اصطکاک نیز در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که اضافه شدن این ورودی و لحاظ کردن اثرات ثانویه موجب کاهش خطای الگو می‌شود، بگونه‌ای که حداکثر خطای الگو برابر ۸٪ است.

ژنگما [۱۰] مروری کامل از روش‌های مختلف الگوسازی، طراحی و پیاده‌سازی پیشگر دور موتور را ارائه داده است. روش‌های مختلفی برای پایش دور در شرایط دور آرام انجام شده است.

لوشی و همکاران از پایش پیش‌بین بدین منظور استفاده کرده‌اند [۱۱]. نتایج پیاده‌سازی نشان می‌دهد که پیشگر عملکرد مناسبی به هنگام اعمال بارهای مختلف را دارد. پایش تطبیقی^۲ نیز توسط یلدز و همکاران طراحی و پیاده‌سازی شده است [۱۲].

نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی نشان می‌دهد که پیشگر، پاسخ گذرای سریع و مناسبی به بارهای اعمال شده می‌دهد. شبکه عصبی نیز به عنوان روشی دیگر به منظور پایش دور موتور با استفاده از زاویه جرقه استفاده شده است [۱۳].

پایش مرحله‌ای^۳ روشی بر پایه قوانین خبره است که برای سامانه‌هایی که رفتار ورودی و خروجی آنها مشخص است، بسیار مناسب است.

به پیشگر مرحله‌ای در زمینه خودرو به دلیل عملکرد مناسب توجه خوبی شده است اما پیچیدگی محاسباتی آن موجب شده که کمتر در صنعت استفاده شود زیرا مستلزم استفاده از ریزپیشگر سریعتر و متعاقباً گران‌تر است [۱۴].

با توجه به غیرخطی بودن رفتار موتور و عدم قطعیت‌های موجود ناشی از قطعات تشکیل‌دهنده و گرانبوی روغن، پیشگر مرحله‌ای گزینه مناسبی برای پایش دور موتور است.

² Adaptive control

³ Phase

¹ Modeled engine

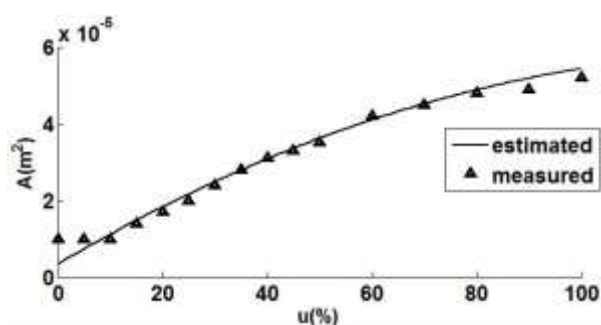
موتور پله‌ای با استفاده از میله‌ای که به آن متصل است، در ۲۰۰ گام دریچه را باز و بسته می‌کند. شکل ۲ داده‌های موجود در جدول تنظیم رایانه موتور بنزینی XU7-1761cc، وابسته به مقدار مساحت مؤثر دریچه (A) برای عبور هوا بر حسب درصد بازشدگی را نشان می‌دهد.

با برازش یک چندجمله‌ای مرتبه دوم به این داده‌ها مطابق شکل ۲ معادله زیر برای استفاده در الگو بدست می‌آید.

$$A = \frac{-2.95 \times 10^{-5}u^2 + 0.00804u + 0.03409}{10000} \quad (1)$$

نشان‌دهنده درصد بازشدگی دریچه است. تخمین فوق در درصدهای بازشدگی کمتر دارای خطای بیشتری است.

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده از موتور، حداقل مقدار بازشدگی دریچه هوای کنارگذر در ناحیه دور آرام بیشتر از ناحیه با خطای زیاد است و لذا خطای مذکور قابل صرف نظر کردن است.



شکل ۲: مساحت مؤثر تخمینی دریچه هوای کنارگذر برای عبور هوا

۲-۲- چندراهه ورودی

جریان هوای چندراهه را می‌توان به صورت اختلاف جریان هوای ورودی به چندراهه و جریان هوای خروجی از آن در نظر گرفت. با توجه به این که هوای ورودی سامانه، گاز کامل در نظر گرفته می‌شود، با استفاده از قوانین گازهای کامل، معادله فشار هوای چندراهه بدست می‌آید [۱۶].

$$\frac{dp_m(t)}{dt} = \frac{Rv_m(t)}{V_m} [\dot{m}_{in}(t) + \dot{m}_{out}(t)] \quad (2)$$

در معادله فوق R ثابت گازها، v_m دمای چندراهه و V_m حجم چندراهه است. m_{in} و m_{out} به ترتیب جریان هوای ورودی و خروجی چندراهه هستند. با توجه به کوچک بودن سطح مقطع دریچه هوای کنارگذر، وقتی سرعت هوای خروجی از دریچه هوا به سرعت صوت نزدیک شود، بیشترین جریان هوا از دریچه عبور

در این مقاله پایشگری مرحله‌ای به صورت ترکیبی با پایشگر PID برای پایش دریچه هوا و یک پایشگر مرحله‌ای برای پایش زاویه جرکه با هدف رسیدن دور موتور به دور مرجع طراحی شده است. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پایشگر مرحله‌ای طراحی شده پاسخ گذرای بهتری داشته و در مقابل بارهای اعمال شده به موتور رفتار قابل قبولی دارد. با توجه به این که در راهبرد پایش دور در شرایط دور آرام، نسبت هوا به سوخت ثابت در نظر گرفته شده است، نتایج نشان می‌دهند که مصرف سوخت به اندازه ۱۴٪ کاهش پیدا کرده است که متعاقباً موجب کاهش مقدار آلاینده‌گی می‌شود.

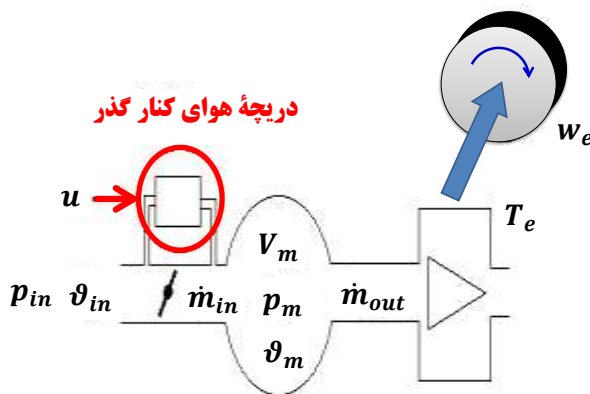
۲- الگوی موتور احتراق داخلی در شرایط دور آرام

طراحی پایشگر دور موتور در شرایط دور آرام، نیازمند الگوی ساده‌ای از موتور تحت این شرایط است. برای توسعه الگو، از قوانین فیزیکی و برخی جداول تنظیم موتور استفاده شده است. علامت‌های زاویه جرکه و مقدار بازشدگی دریچه هوای کنارگذر به عنوان ورودی و دور موتور، خروجی الگو است. الگوی موتور در شرایط دور آرام را می‌توان به سه قسمت اصلی تقسیم کرد:

- ۱- دریچه هوای کنارگذر
- ۲- چندراهه ورودی
- ۳- بخش تولید گشتاور.

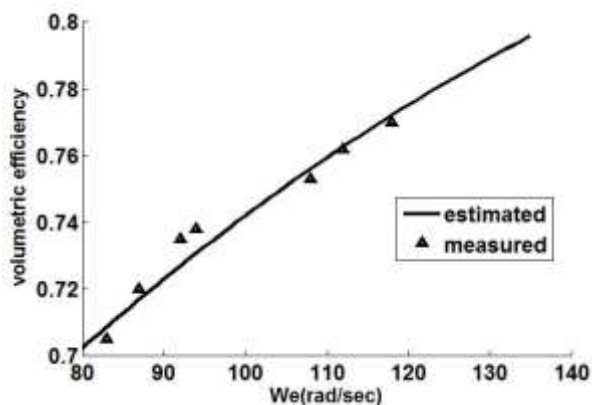
۲-۱- دریچه هوای کنارگذر

در موتورهای دارای دریچه هوای مکانیکی، در شرایط دور آرام، دریچه هوای اصلی که با اهرم گاز توسط راننده پایش می‌شود، بسته است و لذا هوای ورودی، از یک دریچه هوای کنارگذر، مطابق با شکل ۱، موازی با دریچه اصلی، وارد موتور می‌شود. مقدار بازشدگی این دریچه توسط رایانه خودرو و بوسیله یک موتور پله‌ای^۱ تنظیم می‌شود [۱۵].



شکل ۱: دریچه هوای کنارگذر موتور

^۱ Stepper motor



شکل ۴: تخمین بازده حجمی با استفاده از دور موتور

۲-۳- واحد مولد سرعت و گشتاور

هدف اولیه موتور تولید توان مکانیکی یا گشتاور است که تابعی غیرخطی از متغیرهای زیادی نظیر مقدار پاشش سوخت، زمان جرقه، مقدار هوا به سوخت و ... است.

$$T_e = f(\dot{m}_\phi, \lambda, \phi_0, \dots) \quad (6)$$

معادله سرعت و گشتاور مکانیکی به صورت زیر است.

$$\theta_e \frac{dw_e(t)}{dt} = T_e - T_f - T_L \quad (7)$$

بار و θ_e لختی موتور است. گشتاور اصطکاک را می‌توان با یک چند جمله وابسته به دور موتور تقریب زد. با استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام شده از موتور، معادله زیر برای محاسبه گشتاور اصطکاک استفاده می‌شود [۸].

$$T_f = 20.7 + 1.6w_e \times 10^{-4} \quad w_e > 0 \quad (8)$$

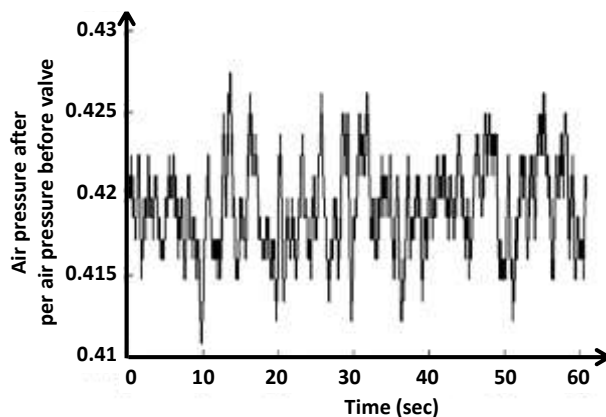
با توجه به این که بازه تغییرات دور موتور در شرایط دور آرام محدود است، در این محدوده، بستگی گشتاور اصطکاک خطی در نظر گرفته شده و از جملات مرتبه دوم و بالاتر صرف نظر شده است. گشتاور موتور بدین شکل الگو می‌شود که اثر جرقه با $f(\phi_0)$ نشان داده شده است [۱۸].

$$\theta_e \frac{dw_e(t)}{dt} = e \frac{H_L}{4\pi} \frac{p_m}{Rv_m} \frac{\lambda_{VE} V_D}{(1 + \delta_0 \lambda)} f(\phi_0) - T_f(t) - T_L(t) \quad (9)$$

H_L انرژی سوخت، λ نسبت هوا به سوخت، e بازده ترمودینامیکی، δ_0 ضریب غنای هوا به سوخت و ϕ_0 زاویه جرقه است. برای لحاظ کردن اثر جرقه در الگو، از معادله زیر استفاده می‌شود [۱۶].

$$f(\phi_0) = 1 - 0.0006(\phi_0 - MBT)^2 \quad (10)$$

می‌کند. تحت این شرایط، فشار هوا در خروجی دریچه کمتر از نصف فشار هوا در ورودی دریچه خواهد بود که مطابق شکل ۳، اندازه‌گیری‌های انجام شده از موتور در حالت دور آرام، نشان‌دهنده این امر است.



شکل ۳: نسبت فشار هوای خروجی دریچه به فشار هوای ورودی آن

با فرض برقراری این شرایط برای دریچه هوای کنارگذر، جریان هوای ورودی \dot{m}_{in} را می‌توان بدین شکل الگو کرد [۱۷].

$$\dot{m}_{in}(t) = c_d A \frac{p_{in}(t)}{\sqrt{Rv_{in}(t)}} \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

در معادله فوق c_d ضریب غیر آرمانی، p_{in} فشار هوای ورودی و v_{in} دمای هوای ورودی است.

موتور را می‌توان به صورت یک تلمبه در نظر گرفت که متناسب با دور خود، جریان هوایی را به داخل استوانه هدایت می‌کند. بنابراین جریان هوای خروجی از چندراهه به این صورت الگو می‌شود [۱۶].

$$\dot{m}_{out}(t) = \frac{p_m}{Rv_m} \lambda_{VE} \frac{V_D}{N} \frac{w_e(t)}{2\pi} \quad (4)$$

V_D حجم هوای جایگزین و w_e دور موتور است. متغیر N تعداد دور میل لنگ در هر چرخه موتور در نظر گرفته می‌شود که برای موتور چهارزمانه این مقدار برابر ۲ است. λ_{VE} نشان دهنده بازده حجمی بوده و تابعی از متغیرهای موتور از جمله دور موتور و فشار چندراهه بوده و الگوسازی آن به صورت تحلیلی پیچیده است [۸].

با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده از موتور و جداول تنظیم و برازش آنها با استفاده از یک چند جمله‌ای مرتبه دوم مطابق شکل ۴، از معادله زیر برای تقریب بازده حجمی استفاده شده است.

$$\lambda_{VE} = 0.48 + 3.42w_e \times 10^{-3} + 10^{-6}w_e^2 \quad (5)$$

¹ Choked condition



الف

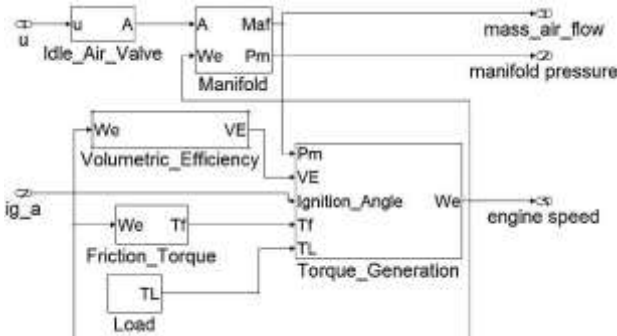


ب

شکل ۵: چپش استفاده شده برای اندازه‌گیری متغیرهای موتور. الف: اتصال رایانه به کارت CAN ب: اتصال رایانه موتور به کارت.

شکل ۸ گشتاور بار اضافی خنک‌کن که به صورت پله‌ای در شرایط کارکرد دور آرام به موتور اعمال شده است را بر حسب نیوتون متر (Nm) نشان می‌دهد. مقدار جریان هوای ورودی به استوانه حاصل از الگو و جریان اندازه‌گیری شده در آزمون در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. در شکل ۱۰ فشار هوای چندراهه حاصل از شبیه‌سازی الگو با مقدار اندازه‌گیری شده از آزمون موتور مقایسه شده‌اند.

با توجه به این که خروجی اصلی الگو، دور موتور است، در این قسمت داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از پایش حلقه بسته دور موتور در شرایط دور آرام با خروجی الگو که از اعمال علامت پایشی مشابه حاصل می‌شود، مقایسه می‌شود. شکل ۱۱ مقایسه بین دور موتور واقعی و خروجی الگو را نشان می‌دهد.



شکل ۶: پیاده‌سازی الگو در محیط شبیه‌سازی سیمولینک

همواره $0 < f(\varphi_0) < 1$ و MBT زاویه جرقه‌ای است که در آن بیشترین گشتاور اتفاق می‌افتد و تابعی از دور موتور است.

$$MBT = 0.095w_e + 12 \quad (11)$$

۳- شبیه‌سازی، تطبیق الگو با موتور بنزینی XU7-1761cc و ارزیابی آن

در این بخش الگوی ارائه شده با موتور بنزینی XU7-1761cc تطبیق داده می‌شود. مشخصات موتور در جدول ۱ نشان داده شده است. فرض شده است که نسبت هم ارزی سوخت با هوا برابر یک باشد.

جدول ۱: مشخصات موتور

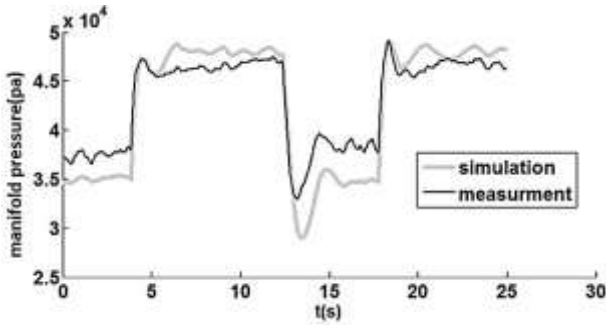
نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
ظرفیت موتور	۱٫۷۶ لیتر
تعداد استوانه	۴
نسبت تراکم	۹٫۳
طول جابجایی	۸۱٫۴ میلی متر
قطر استوانه	۸۳ میلی متر
قطر دریچه هوای اصلی	۵۳٫۵ میلی متر
قطر دریچه هوای کنارگذر	۹٫۶ میلی‌متر

چپش لازم برای اندازه‌گیری متغیرها در شکل ۵ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری متغیرهای لازم از موتور، از کارت‌های CAN شرکت ETAS استفاده شده است. داده‌ها با نرخ 100 Hz به صورت بلادرنگ از رایانه موتور خوانده شده و در حافظه ذخیره می‌شود.

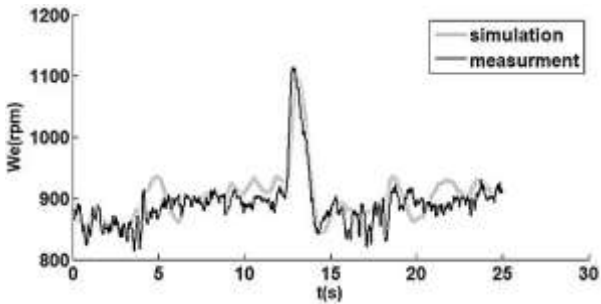
با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری شده، الگو در محیط سیمولینک ۲۰۱۲a شبیه‌سازی شده است. مطابق شکل ۶ سیستم از سه قسمت اصلی تشکیل شده است که شامل دریچه هوای کنارگذر، چندراهه و واحد مولد سرعت و گشتاور اند.

به منظور مقایسه رفتار موتور واقعی و الگوی ارائه شده از ساختاری مطابق شکل ۷ استفاده شده است. در این ساختار رایانه خودرو، موتور را بصورت حلقه بسته پایش می‌کند. علامت‌های فرمان اعمال شده به موتور، عیناً به الگو اعمال می‌شوند و خروجی الگو با شبیه‌سازی بدست می‌آید.

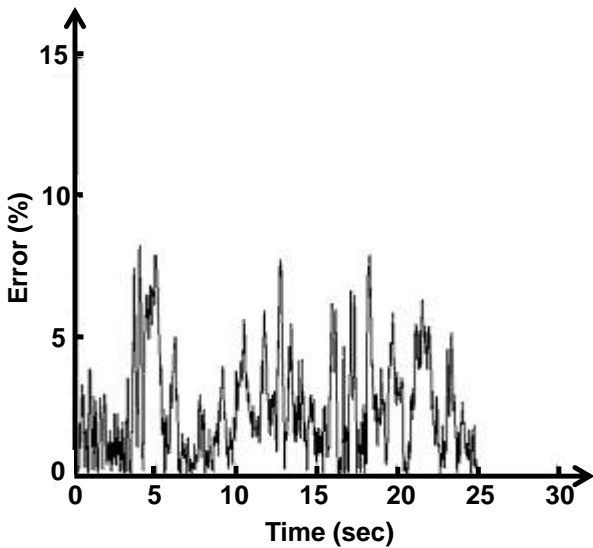
به منظور مقایسه عملکرد الگو با رفتار موتور، جریان هوای ورودی به استوانه، فشار چندراهه و دور موتور به عنوان خروجی در شبیه‌سازی لحاظ می‌شود.



شکل ۱۰: مقایسه متغیر فشار چندراهه اندازه‌گیری شده در موتور و تخمین آن توسط الگو

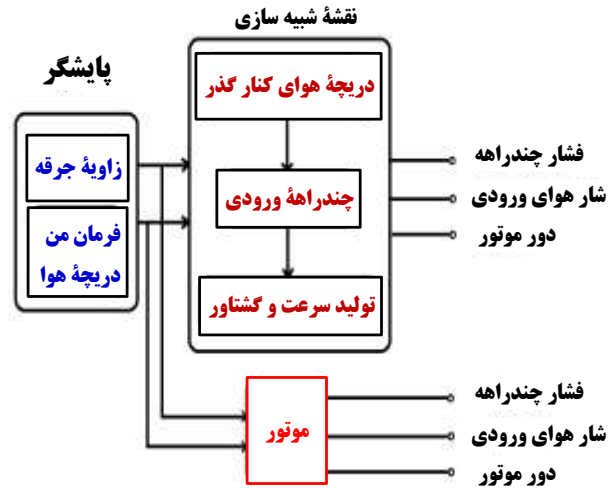


شکل ۱۱: مقایسه دور موتور اندازه‌گیری شده و خروجی الگو

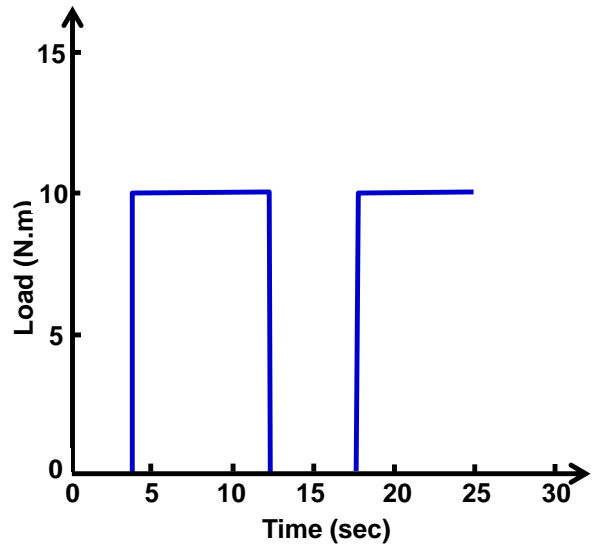


شکل ۱۲: درصد اختلاف بین دور موتور واقعی و خروجی الگو (درصد خطای الگو در تخمین دور)

اثر تغییر زاویه جرقه روی دور موتور را می‌توان در شکل ۱۳ مشاهده کرد. مطابق شکل مشاهده می‌شود که در لحظه اعمال بار اضافی خنک‌کن (شکل ۱۳-ب 4 s -t)، پایشگر، درصد بازشدگی دریچه (شکل ۱۳-د) را افزایش داده است و پس از آن، در عین کاهش مقدار بازشدگی دریچه، پیشی در زاویه جرقه (شکل ۱۳-ج)، از افت بیش از حد دور موتور جلوگیری کرده است.



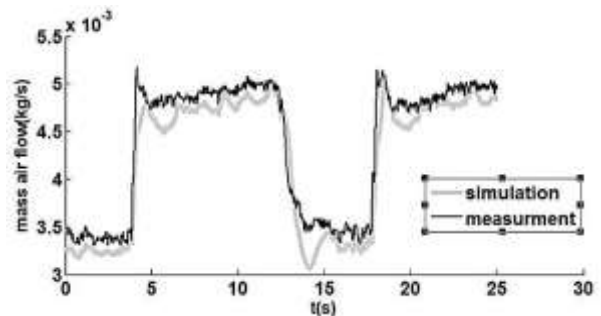
شکل ۷: ساختار مورد استفاده برای مقایسه خروجی الگو با خروجی موتور



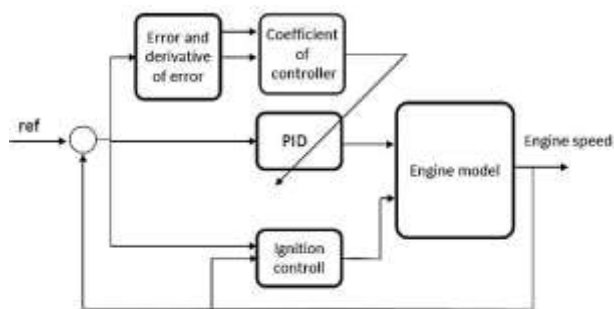
شکل ۸: اعمال گشتاور پله‌ای بار خنک‌کن بر حسب زمان

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود حداکثر خطای الگوی ارائه شده نسبت به نتایج آزمون ۸٪ است. خطای نسبی نیز از معادله زیر، ۲،۳۳٪ بدست آمده است.

$$error = \sum_{j=1}^n \frac{|w_{ej}^{measurement} - w_{ej}^{model}|}{w_{ej}^{measurement}} \quad (12)$$



شکل ۹: مقایسه جریان هوای ورودی به استوانه و تخمین آن توسط الگو



شکل ۱۴: نقشه تصویری پایشگر دور موتور به همراه الگو

۴-۱- پایش کننده دریچه هوای کنارگذر

پایشگر دریچه هوای کنارگذر از نوع PID است که ضرایب آن به صورت بلادرنگ توسط منطق مرحله‌ای تنظیم می‌شود. تابع انتقال پایشگر PID بدین شکل در نظر گرفته شده است:

$$G_c(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i(s)} + T_d(s) \right] \quad (13)$$

که در آن

$$T_i = \frac{K_p}{K_i}, T_d = \frac{K_d}{K_p} \quad (14)$$

T_i و T_d ثابت زمانی انتگرالی و تناسبی و K_p و K_i و K_d به ترتیب بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی هستند. فرمان پایشی به شکل زیر است.

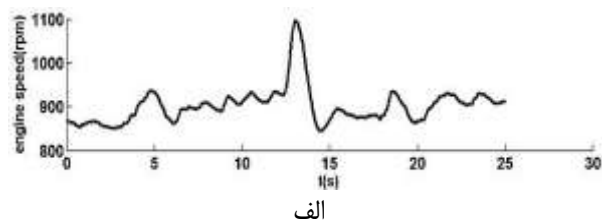
$$u(k) = K_p E(k) + K_i T_s \sum_{i=1}^n E(i) + \frac{K_d}{T_s} \Delta E(k) \quad (15)$$

عملکرد پایشگر PID بستگی به انتخاب مناسب بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی دارد. انتخاب بهره‌های تناسبی، انتگرالی مشتقی که قادر باشند تا بهترین عملکرد را برای آن فراهم نمایند، کار ساده‌ای نیست. در عمل بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی معمولاً با استفاده از تجربه اشخاص خبره و بر پایه تعدادی قواعد کلی استخراج می‌گردند.

سامانه مرحله‌ای بر مبنای یک مجموعه از قواعد اگر-آنگاه مرحله‌ای بنا نهاده شده است که چگونگی انتخاب بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی را تحت شرایط عملکرد مشخص تشریح می‌کند.

فرض می‌شود که بهره‌های تناسبی و مشتقی به ترتیب در محدوده‌های $[K_p \min, K_p \max]$ و $[K_d \min, K_d \max]$ باشد. به منظور ساده‌سازی ضرایب تناسبی و مشتقی به محدوده بین صفر و یک، بوسیله تبدیل خطی زیر واحد می‌شوند.

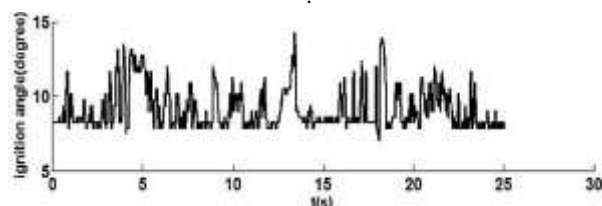
$$K'_p = \frac{K_p - K_{p,\min}}{K_{p,\max} - K_{p,\min}} \quad (16)$$



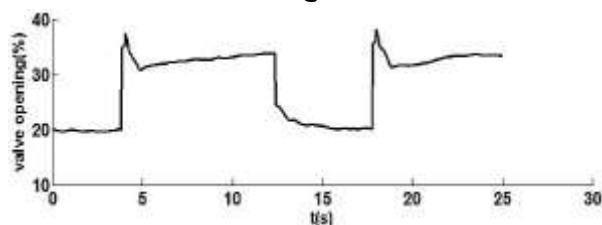
الف



ب



ج



د

شکل ۱۳: بررسی تأثیر هم‌زمان ورودی هوا و ورودی جرقه بر دور موتور حاصل از الگو. الف: دور موتور، ب: گشتاور بار خنک‌کن، ج: زاویه جرقه اعمال شده به موتور به منظور پایش سریع اثر گذرای بار، د: درصد بازشدگی دریچه هوا

۴- طراحی پایشگر دور آرام

پایشگر PID علی‌رغم سادگی، با تنظیم مناسب ضرایب آن، عملکرد مناسبی در پایش دور موتور دارد. حال اگر در نقاط کاری مختلف، با توجه به شرایط این ضرایب متفاوت انتخاب شود، عملکرد پایشگر بهتر خواهد بود، زیرا عملکرد پایشگر PID با ضرایب متغیر بهتر از حالت ضرایب ثابت است.

از طرفی پایش مرحله‌ای، روشی مناسب برای پایش سامانه‌های غیرخطی و پیچیده از جمله موتور خودرو است و کاربرد آن، بویژه زمانی که قوانین خبره برای شیوه پایش موجود است، بسیار مؤثر است. بنابراین استفاده از پایشگر PID به صورت ترکیبی با پایشگر مرحله‌ای گزینه مناسبی برای پایش موتور به نظر می‌رسد.

شکل ۱۴ ساختار پایشگر دور موتور طراحی شده را به همراه الگو نشان می‌دهد. در این ساختار از یک پایشگر مرحله‌ای برای پایش زاویه جرقه و یک پایشگر ترکیبی مرحله‌ای PID برای پایش مقدار بازشدگی دریچه استفاده شده است.

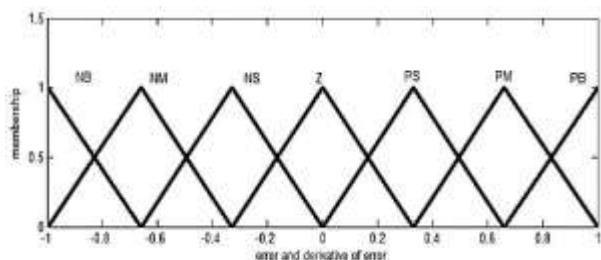
با توجه به معادله ۱۹ برای زیاد بودن بهره انتگرالی، α باید زیاد باشد. پس:

If E (k) is PB and ΔE (k) is Z, then K'_p is B and K'_d is S and α is S.

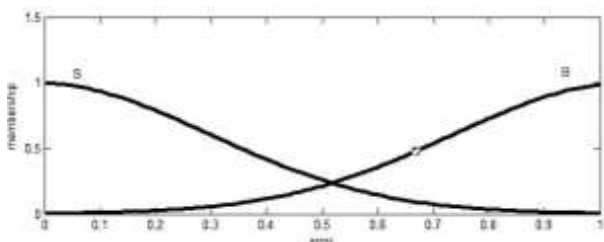
در نقطه b، به منظور جلوگیری از بالا زدگی، علامت پایشی کوچکی مورد نیاز است. در نتیجه باید بهره تناسبی و انتگرالی کوچک و بهره مشتقی بزرگ اعمال شود. پس:

If E (k) is Z and ΔE (k) is NB, then K'_p is S and K'_d is B and α is VB.

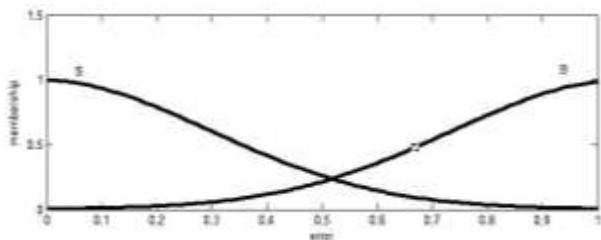
قوانین مرحله‌ای برای بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی مطابق جداول ۲ تا ۴ هستند.



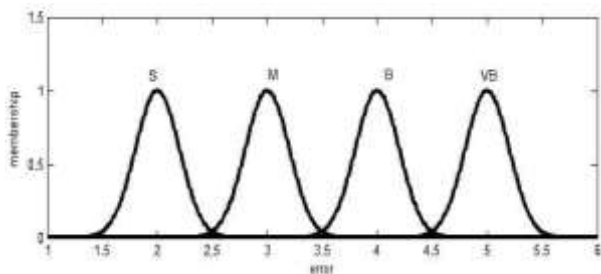
الف



ب



ج



د

شکل ۱۵: مجموعه‌های مرحله‌ای تعریف شده برای پایشگر مقدار باز زدگی در ریچه هوای کنار گذر. الف: خطا و تغییرات آن، ب: ضریب تناسبی، ج:

ضریب مشتقی، د: α

$$K'_d = \frac{K_d - K_{d,min}}{K_{d,max} - K_{d,min}} \quad (17)$$

فرض می‌شود که ثابت زمانی انتگرال نسبت به ثابت زمانی مشتق به صورت زیر تعیین گردد [۱۹].

$$T_i = \alpha T_d \quad (18)$$

که با توجه به آن از معادله ۱۴ داریم:

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d} = \frac{K_p^2}{\alpha K_d} \quad (19)$$

و لذا K'_d ، K'_p و α متغیرهایی هستند که بوسیله سامانه مرحله‌ای بر اساس خطا و مشتق اول آن تعیین می‌گردند. پس از تعیین متغیرها توسط قوانین مرحله‌ای، بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی می‌توانند از این روابط بدست می‌آیند.

$$\begin{cases} K_p = (K_{p,max} - K_{p,min})K'_p + K_{p,min} \\ K_d = (K_{d,max} - K_{d,min})K'_d + K_{d,min} \end{cases} \quad (20)$$

$$K_i = \frac{K_p^2}{\alpha K_d} \quad (21)$$

که در آن‌ها

$$\begin{cases} K_{p,min} = 0.32 K_u \\ K_{p,max} = 0.60 K_u \\ K_{d,min} = 0.08 K_u T_u \\ K_{d,max} = 0.15 K_u T_u \end{cases} \quad (22)$$

K_u و T_u به ترتیب بهره و دوره نوسان در مرز پایداری پایشگر تناسبی است [۱۹].

فرض می‌شود که قواعد اگر-آنگاه مرحله‌ای بدین شکل اند:

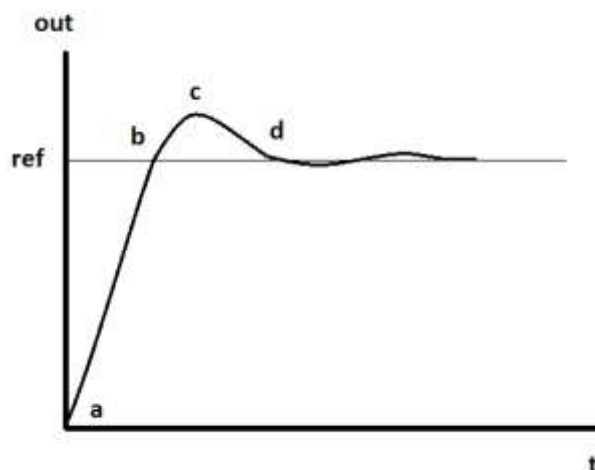
If e (k) is A_i and Δe (k) is B_j , then K'_p is C_k and K'_d is D_l and α is E.

که A، B، C، D و E مجموعه‌های مرحله‌ای هستند. فرض کنید که دامنه مورد نظر برای e، de بازه $[-1, 1]$ باشد و توسط ضرایب تناسبی در ورودی آنها تنظیم شوند. ۷ مجموعه مرحله‌ای برای آنها همانند شکل ۱۵ الف چنان تعریف می‌شود که دامنه مورد نظر را بپوشاند.

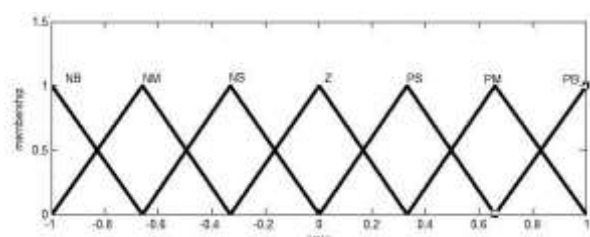
بنابراین یک پایگاه قواعد مرحله‌ای ۴۹ قاعده‌ای تشکیل می‌گردد. توابع تعلق خروجی نیز مطابق شکل ۱۵ ب تا ج تعیین شده‌اند. در این شکل N نشان دهنده منفی، P مثبت، Z صفر، S کوچک، M متوسط و B بزرگ است. در نتیجه برای مثال NB نشان دهنده منفی بزرگ، PM نشان دهنده مثبت متوسط است.

قوانین مرحله‌ای بر اساس تجربیات شخص خبره برای پاسخ پله مطابق شکل ۱۶ نوشته شده‌اند. به عنوان مثال، در ابتدا حول نقطه a، به منظور جهش سریع، فرمان پایشی بزرگی باید اعمال شود، در نتیجه باید بهره تناسبی و انتگرالی زیاد و بهره مشتقی کم باشد.

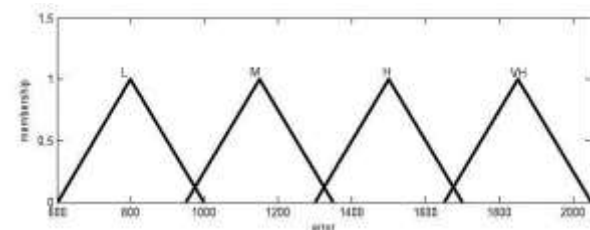
تغییر می‌کند. تغییرات دور موتور در شرایط دور آرام نیز [600,2050] rpm است. با توجه به گستره تغییرات دور موتور در شرایط دور آرام و زاویه گشتاور بیشینه، زاویه جرقه Crk [5,30] در نظر گرفته شده است. قوانین مرحله‌ای مطابق جدول ۵ است. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، زاویه جرقه به عنوان عملگر سریع از افت دور موتور به‌ویژه هنگام اعمال بار، جلوگیری می‌کند. با توجه به این موضوع، قوانین مرحله‌ای به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که به هنگام پایین‌تر بودن دور موتور از دور مرجع، با پیشی در زاویه جرقه، از افت دور موتور جلوگیری شود.



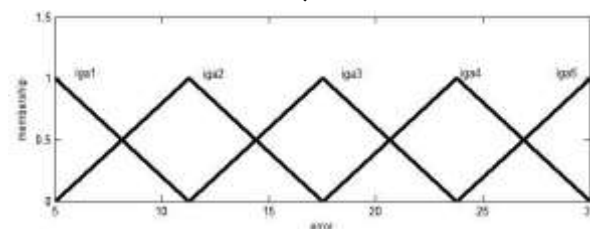
شکل ۱۶: نقاط مختلف و مهم پاسخ پله برای تعیین قواعد مرحله‌ای



الف



ب



ج

شکل ۱۷: مجموعه‌های مرحله‌ای تعریف شده برای پایشگر زاویه جرقه.

الف: دور خطا و تغییرات آن، ب: دور موتور، ج: زاویه جرقه

جدول ۵: قوانین مرحله‌ای برای تعیین زاویه جرقه

N/E	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
N1	iga1	iga1	iga1	iga1	iga2	iga2	iga3
N2	iga1	iga1	iga1	iga2	iga2	iga3	ia3
N3	iga1	iga2	iga2	iga3	iga3	iga4	iga4
N4	iga2	iga2	iga3	iga4	iga4	iga5	iga5

از معادله ۱۰ مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن زاویه جرقه به زاویه بیشینه گشتاور، یا پیشی بیشتر در زاویه جرقه، گشتاور تولید شده موتور افزایش می‌یابد، پس با مثبت‌تر شدن خطا (پایین بودن دور موتور از دور مرجع)، برای تولید گشتاور بیشتر و افزایش دور موتور،

جدول ۲: قوانین مرحله‌ای برای تعیین ضریب تناسبی

$\Delta E/E$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	B	S	S	S	S	S	B
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	B	S	B	S	B	B	B
Z	B	S	B	B	B	B	B
PS	B	S	B	S	B	B	B
PM	B	B	S	S	S	B	B
PB	B	S	S	S	S	S	B

جدول ۳: قوانین مرحله‌ای برای تعیین ضریب مشتقی

$\Delta E/E$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
Z	S	S	S	B	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B	B	B

جدول ۴: قوانین مرحله‌ای برای تعیین α

$\Delta E/E$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	S	M	B	VB	B	M	S
NM	S	M	M	B	M	M	S
NS	S	S	M	M	M	S	S
Z	S	S	S	M	S	S	S
PS	S	S	M	M	M	S	S
PM	S	M	M	B	M	M	S
PB	S	M	B	VB	B	M	S

۴-۲- پایش کننده مرحله‌ای زاویه جرقه

ورودی پایشگر زاویه جرقه، دور موتور و خطای آن است. مطابق شکل ۱۷ الف و ب، ۴ تابع تعلق برای ورودی دور موتور و ۷ تابع تعلق برای خطای آن در نظر گرفته شده است. توابع تعلق خروجی نیز در شکل ۱۷ ج نشان داده شده‌اند. ورودی واحد شده در بازه [۱، -۱]

داشته است، در حالی که برای پیشگر feedback-feed-forward، مقدار افت دور موتور ۴۸ د.د.د. است. همچنین بر اثر اغتشاش وارد شده و تغییر علامت مرجع، زمان نشست دور موتور پایش شده در این حالت ۴ ثانیه کمتر از پاسخ پیشگر feedback-feed-forward است.

به دلیل لختی زیاد دور موتور، با برداشته شدن بار در شکل ۱۹ الف، دور موتور افزایش یافته است، به همین خاطر، واحد پایش برقی با در نظر گرفتن اینرسی، دور مرجع را به هنگام برداشته شدن بار افزایش می دهد.

مقدارتوانایی پیشگر در دنبال کردن علامت مرجع در حضور بار و جلوگیری از افت دور موتور اهمیت زیادی دارد و در هنگام اعمال بارهای بیشتر، احتمال خاموش شدن آن به دلیل عدم عملکرد مناسب پیشگر، افزایش می یابد.

از ورودی مقدار سوخت برای پایش دور در حالت استارت سرد استفاده می شود و برای حالت دور آرام به منظور عملکرد بهینه واکنشگر، نسبت هوا به سوخت ثابت در نظر گرفته می شود.

در نتیجه برای ارزیابی مقدار مصرف سوخت در شرایط استفاده از پیشگر طراحی شده، مقدار جریان هوای اندازه گیری شده از موتور با مقدار آن در الگوی تحت پایش، مقایسه می شود. برای این کار مطابق جدول ۶ در دماهای مختلف کاری، میانگین مقدار هوای ورودی به استوانه ها در مدت زمان ۵۰ s مقایسه می شود.

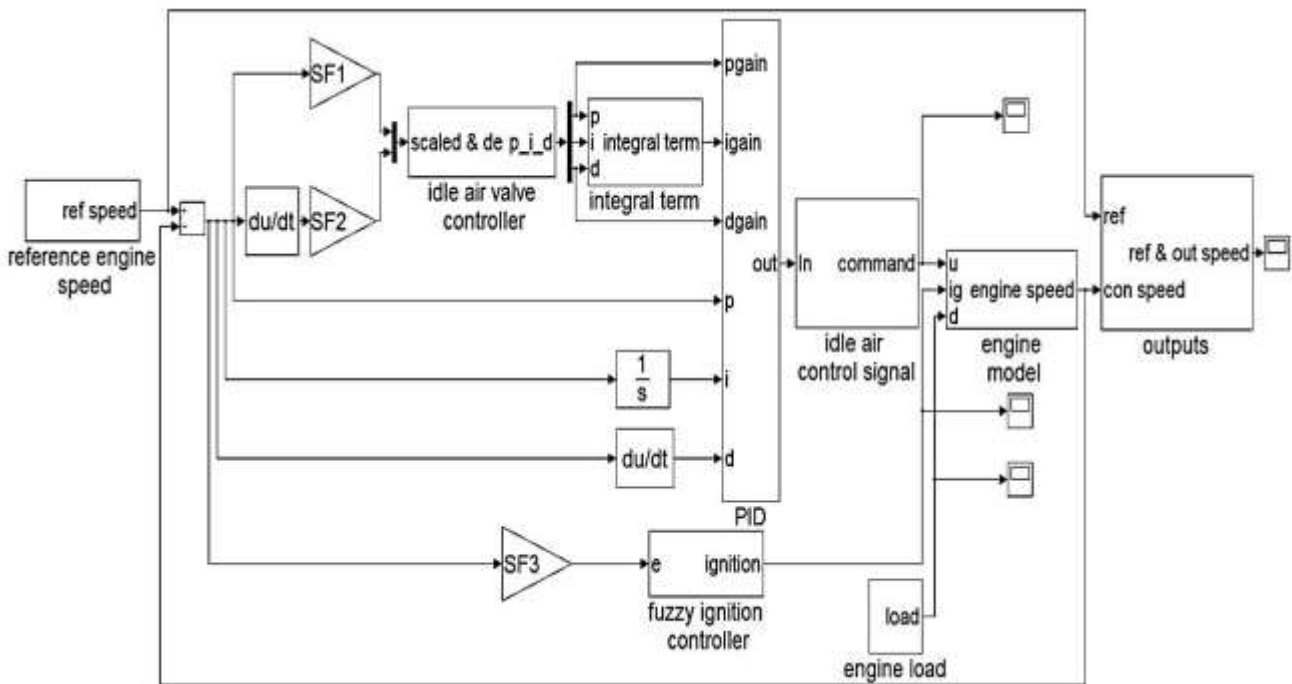
زاویه بالاتری برای جرعه انتخاب می شود. نظر به این که زاویه گشتاور بیشینه تابعی از دور موتور است بنابراین در پیشگر زاویه جرعه، دور موتور نیز باید به عنوان ورودی لحاظ شود.

۵- شبیه سازی پیشگر

در این بخش نتایج شبیه سازی پیشگر ارائه می گردد، شکل ۱۸ نقشه تصویری سامانه پایش سرعت دور آرام موتور را نشان می دهد. برای شبیه سازی از نرم افزار سیمولینک استفاده شده است. پیشگر طراحی شده، برای نشان دادن کارایی مطلوب با الگوی موتور توسعه یافته بخش ۲ سنجش می شود.

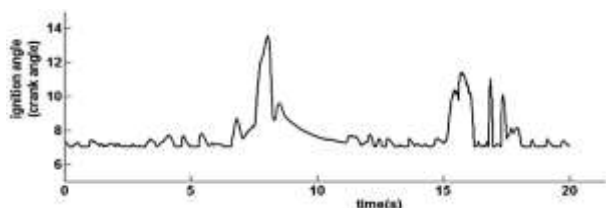
در دمای هوای ورودی 58°C و دمای موتور 97.5°C دور موتور مرجع، دور پایش شده توسط پیشگر، علامت جرعه و مقدار بازشدگی دریچه در شکل ۱۹ نشان داده شده اند. مشاهده می شود که در هنگام اعمال بار به منظور بالا بردن گشتاور تولیدی موتور، زاویه جرعه زودتر زده شده است و پس از گذشت از حالت گذرا، زاویه جرعه به تدریج به حالت اولیه بازگشته است.

با توجه به این که در لحظه اعمال بار، علامت مرجع افزایش پیدا کرده است، مقدار بازشدگی دریچه برای تزریق بیشتر هوا به استوانه افزایش یافته است. شکل ۱۹ الف نشان می دهد که پیشگر طراحی شده، دور مرجع را با دقت بیشتری نسبت به پاسخ سامانه feedback-feed-forward دنبال می کند. در لحظه اعمال بار خنک کن، پاسخ پیشگر مرحله ای طراحی شده، کمتر از ۱۰ rpm افت



شکل ۱۸: نقشه تصویری پایش دور آرام موتور پیاده سازی شده در شبیه سازی متلب^۱

^۱ MATLAB Simulink



د

شکل ۱۹: الف: مقایسه دور موتور پایش شده و اندازه‌گیری شده، ب: گشتاور بار خنک‌کن، ج: فرمان دریچه هوا اعمال شده، د: زاویه جرکه اعمال شده

جدول ۶: آزمون‌های انجام شده در دماهای مختلف برای اندازه‌گیری مصرف سوخت در مدت ۵۰ ثانیه

آزمون	۱	۲	۳
دمای موتور (°C)	۹۷,۵	۸۷,۵	۹۱
دمای هوای ورودی (°C)	۵۸	۶۹,۷۵	۵۴
جرم هوای واقعی (kg)	۰,۱۸۳	۰,۲۳۹	۰,۲۱۶
جرم هوای الگو شده (kg)	۰,۱۵۹	۰,۲۰۰	۰,۱۸۴
مقدار کاهش مصرف سوخت (%)	۱۳,۳۰	۱۵,۴۶	۱۴,۵۳

پیشنهادات

برای دقیق‌تر شدن الگوی توسعه یافته موتور، تأخیر صدور فرمان جرکه و پاسخ دریچه هوا را می‌توان با اندازه‌گیری‌های لازم به موتور اعمال کرد. همچنین اثر نوبه را می‌توان هم در الگو و هم در پایشگر در نظر گرفت.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی و فنی شرکت صنایع تولیدی کروز انجام شده است.

فهرست علائم

A	مساحت دریچه، m^2
D	قطر دریچه، m
d	قطر میله، m
u	علامت فرمان دریچه هوا
m	جرم، kg
H	آنتالپی، J
P	فشار، Pa
V	حجم، m^3
R	ثابت گازها، $\frac{J}{kg K}$
w	دور موتور، $\frac{rad}{s}$
T	گشتاور، $N.m$

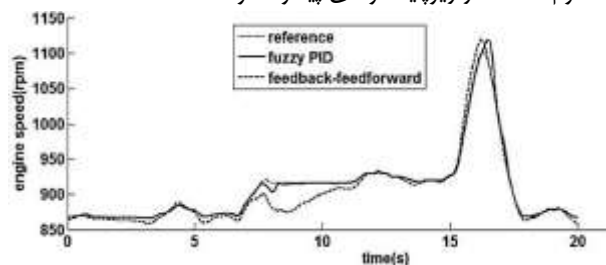
مقدار جریان هوای ورودی به استوانه‌ها به طور میانگین ۱۴,۴٪ کمتر شده و با فرض در نظر گرفته شده برابری نسبت هوا به سوخت در حالت دور آرام، می‌توان نتیجه گرفت که در حالت دور آرام مقدار مصرف سوخت به این اندازه کاهش یافته است.

علت این کاهش مصرف، پایش مناسب‌تر دو ورودی زاویه جرکه و دریچه هوای کنارگذر است. به عبارت دیگر با پایش بهینه‌تر دو ورودی مذکور برای رسیدن به دور موتور مطلوب، مقدار هوا و در نتیجه مقدار سوخت (با فرض این که لامبدا پایش شده است و نسبت هوا به سوخت برابر ۱ است)، کاهش یافته است.

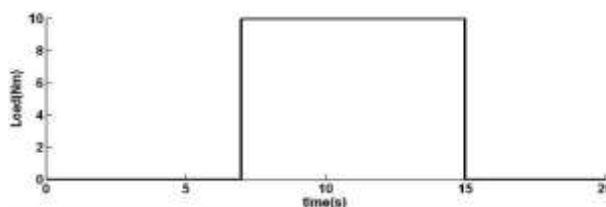
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پایشگر ترکیبی مرحله‌ای-PID با رویکرد الگو محور و بر مبنای الگوی تنظیم شده با موتور XU7-1761cc توسعه داده شده است. الگوی بدست آمده به نوبه خود از ویژگی‌های مهمی برخوردار است به طوری که رفتار خانواده وسیعی از موتورهای احتراق جرکه‌ای را توصیف می‌کند. میانگین خطای الگو در تخمین دور موتور ۲,۳۳٪ و حداکثر خطای آن ۸٪ است.

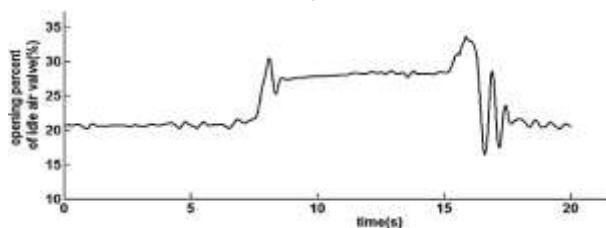
پایشگر طراحی شده عملکرد مناسب و مقاومی در مقابل بارهای خارجی دارد و باعث کاهش مصرف سوخت تا حدود ۱۴,۴٪ در شرایط دور آرام نسبت به پایشگر feedback-feed-forward پیاده‌سازی شده در واحد پایش الکترونیکی خودرو می‌گردد. هزینه‌ای که در مقابل نتایج بدست آمده پرداخت می‌شود، پیچیدگی بیشتر پایشگر است که مستلزم استفاده از ریزپایشگرهای پیشرفته‌تر است.



الف



ب



ج

- [4] R. Jurgen, Automobile Electronics Handbook. NewYork: McGraw-Hill, 1995
- [5] H. Devor, J. Sun., Models and control methodologies for IC engine idle speed control design, Control Engineering Practice Vol. 5, No. 8, pp. 1093-1100, 1997
- [6] C. E. Baumgartner, et al., Robust multivariable idle speed control, American Control Conference, IEEE, 1986.
- [7] G. Nicolao., et al., Identification and idle speed control of internal combustion engines, Control Engineering Practice Vol. 7, No. 9, pp. 1061-1069, 1999
- [8] D. Cho, J. K. Hedrick, Automotive powertrain modeling for control, Journal of dynamic systems, measurement, and control Vol. 111, No. 4, pp. 568-576, 1989
- [۹] بنارضایی ساسان و شالچیان مجید، توسعه الگوی پایش‌پذیر موتور احتراق داخلی در شرایط دور آرام، هشتمین همایش بین‌المللی موتورهای درون‌سوز، پژوهشکده صنعت نفت، بهمن ۹۲.
- [10] Ye, Zhengmao. Modeling, identification, design, and implementation of nonlinear automotive idle speed control systems—an overview, Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on 37.6, pp. 1137-1151, 2007
- [11] Shu, Li, et al. Model predictive control based on observer for engine idle speed control, Control Conference (CCC), 2012 31st Chinese. IEEE, 2012
- [12] Yildiz, Yildiray, et al. Spark-ignition-engine idle speed control: An adaptive control approach. Control Systems Technology, IEEE Transactions on 19.5 pp. 990-1002, 2011
- [13] J. Czarnigowski, A neural network model-based observer for idle speed control of ignition in SI engine, Engineering Applications of Artificial Intelligence Vol. 23, No. 1, pp.1-7, 2010
- [14] K. Nikzadfar, A. Noorpoor, A. H. Shamekhi., Design of an optimal idle speed controller for a turbocharged diesel engine using fuzzy logic method, Journal of mechanical science and technology, Vol. 26, No. 8, pp. 2325-2336, 2012
- [15] L. Glielmo, S. Santini, I. Cascella, Idle speed control through output feedback stabilization for finite time delay systems, in Proc. Amer. Control Conf., Chicago, IL, vol. 1, pp. 45-49, Jun. 2000
- [16] L. Guzzella and C. H. Onder, Introduction to Modeling and control of internal combustion engine systems, 1st ed. Berlin, Germany: Springer, 2004
- [17] J. B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988
- [18] Z. Jiangyan, T. Shen, R. Marino., Model-based cold-start speed control scheme for spark ignition engines, Control Engineering Practice, Vol. 18, No. 11, pp. 1285-1294, 2010
- [19] Z. Z. Yu, M. Tomizuka, S. Isaka., Fuzzy gain scheduling of PID controllers, Control Applications, 1992., First IEEE Conference on. IEEE, 1992

e	بازده ترمودینامیکی
c_d	ضریب غیر آرمانی
E	خطا
T	ثابت زمانی
K	بهره

علائم یونانی

ν	دما، K
ρ	چگالی، $\frac{kg}{m^3}$
λ	نسبت هوا به سوخت
δ	نسبت غنای هوا به سوخت
θ	لختی، $m^2 kg$
φ	زاویه جرکه ($^{\circ}C$)

زیرنویس‌ها

in	ورودی چندراهه
out	خروجی چندراهه
m	چندراهه
VE	بازده حجمی
D	جایگزین
f	اصطکاک
e	موتور
φ	سوخت
i	انتگرال
d	مشق
p	تناسب

مراجع

- [1] D. Cairano, Stefano, et al. Model predictive idle speed control: Design, analysis, and experimental evaluation, Control Systems Technology, IEEE Transactions on 20.1, pp. 84-97, 2012
- [2] J. W. Grizzle, J. Buckland, and J. Sun., Idle speed control of a direct injection spark ignition stratified charge engine, International Journal of Robust and Nonlinear Control Vo. 11, No. 11, pp. 1043-1071, 2001
- [3] Yue-Lin, Li, et al., Study of compound fuzzy-PID control method for gasoline engine idling speed control, Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2013 Fifth International Conference on. IEEE, 2013



Development of a model based combined Fuzzy-PID controller for idle speed control of internal combustion engine

S. Banarezaie^{*1}, M. Shalchian²

¹Amirkabir University, Tehran, Iran, sasan.rezaie@gmail.com

²Amirkabir University, Tehran, Iran, shalchian@aut.ac.ir

^{*}Corresponding Author, Telephone Number: +98-09148339400

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 February 2015

Accepted: 21 September 2015

Keywords:

Internal combustion engine

Engine model

Idle speed control

Fuzzy controller

PID controller

ABSTRACT

In this paper a combined fuzzy-PID controller for idle speed control of internal combustion engine has been developed. The main purpose of this controller is appropriate engine operating under normal and transient loads and reduction of emission and fuel consumption. Using the approach of model based controller design, first, an engine model for the idle state has been developed. In this model idle air valve command and ignition angle are used as inputs and engine speed has been calculated as output. In order to evaluate the behavior of the model, XU7-1761cc gasoline engine data has been used within the idle state. Average error for developed model is 2.33% and maximum error is 8%. Speed control is performed by two new Fuzzy and Fuzzy-PID controllers. Ignition angle and idle air valve opening rate are two outputs of the controlled transient conditions under applying external load such as air condition, power steering and alternator have been simulated. Simulation results show that designed controller has stable and acceptable behavior under transient load condition and reduces fuel consumption up to 14.4% compared to the feedback-feedforward controller implemented in electronic control unit of the vehicle.



© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.

