



اولین همایش ملی شبیه سازی سیستم های مکانیکی
اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اسفند ۱۳۹۰

کنترل PID در پیچیه ی گاز موتور SI جهت پایداری فرکانس برق تولیدی ژنراتور با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

جعفر غفوری^۱، مجتبی دیباگر^۲، ماکان اعرابی^۳، لاریسا خدادادی^۴

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، دانشکده مکانیک، gh_jafar@yhaoo.com

^۲دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، عضو انجمن مکانیک mdibagar1366@gmail.com

^۳دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، گروه عضو انجمن مکانیک makan_arab@iaut.ac.ir

^۴دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، دانشکده برق lkhodadadi@iaut.ac.ir

مقدمه

توسعه ی ساخت نیروگاه های کوچک و توجه به مسائل زیست محیطی در دنیا باعث شده که مصرف کننده های انرژی و تولیدکننده های آن به سمت تجهیزات راندمان بالا روند. امروزه با پیشرفتی که در زمینه ی سیستم های CHP صورت گرفته با تولید همزمان برق و حرارت و سرمایش، راندمان تولید به بالای ۸۵ درصد رسیده است [۱].

مصرف سوخت بهینه، کاهش تلفات تولید، توزیع و انتقال به دلیل محلی بودن نیروگاه، کاهش آلودگی محیط زیست، عدم نیاز به آب (که مهمترین مشکل تأسیس نیروگاه می باشد)، استفاده از راندمان حداکثر تولید برق ۴۷ درصد و مشارکت بخش خصوصی در تأمین برق از جمله دلایلی می باشد که تولیدکنندگان را به سمت سرمایه گذاری بر روی این نیروگاه های کوچک سوق می دهند. محرک اولیه که عمدتاً در سیستم های تولید همزمان (CHP) استفاده می شود عبارتند از توربین های بخار، توربین های گازی و موتورهای رفت و برگشتی، که در بین اینها موتورهای رفت و برگشتی به دلیل راندمان بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. محرک های گاز سوز از نوع اشتعال جرقه ای می باشند.

مسأله ی کنترل توان و فرکانس یکی از موضوعات اساسی در طراحی و بهره برداری سیستم های قدرت بوده و امروزه با توجه به گسترش ابعاد و تغییر ساختار و پیچیدگی سیستم های قدرت، ضرورت آن بیش از پیش احساس می شود [۲].

موتور اشتعال جرقه ای وظیفه ی تأمین دور ثابت برای ژنراتور مورد استفاده جهت تولید توان با فرکانس و ولتاژ ثابت را بر عهده دارد. از اینرو جهت کنترل دور موتور به ازای بارهای مختلف و بارهای ناگهانی که از طریق شبکه ی برق به ژنراتور وارد می شود، باید میزان هوای ورودی به موتور از طریق کنترل میزان گشودگی دریچه هوا صورت بگیرد. در موتورهای قدیمی این کنترل کاملاً بصورت دستی و مکانیکی صورت می گرفت اما با گسترش کنترل کننده های الکترونیکی، با کنترل زمان جرقه، زمان باز و بسته شدن سوپاپ ها،

چکیده

امروزه راندمان بالای سیستم های تولید همزمان برق و حرارت بشدت توجه تولیدکنندگان و مصرف کنندگان برق را به خود معطوف کرده است و سادگی، هزینه ی پایین و راه اندازی سریع موتورهای درونسوز باعث شده است تا به عنوان محرک در سیستم های تولید برق CHP مورد استفاده قرار گیرند و پایداری فرکانس برق تولیدی ژنراتور در سیستم های قدرت از اهمیت بسیاری برخوردار است، و پایداری فرکانس برق تولیدی وابسته به پایداری سرعت موتور محرک می باشد. در موتورهای اشتعال جرقه ای، کنترل سرعت موتور با تنظیم میزان هوای ورودی به سیلندر توسط دریچه ی گاز صورت می گیرد.

در این مقاله با کویل و اجرای همزمان نرم افزار GT-Power با سیمولینک^۱ نرم افزار متلب^۲ این امکان بوجود آمده است تا مدل سازی موتور در نرم افزار GT-Power صورت گرفته و طراحی کنترل کننده ی PID^۳ که ضرایب آن توسط الگوریتم رقابت استعماری بهینه سازی شده در محیط سیمولینک صورت پذیرد. انطباق نتایج مدل سازی موتور بر داده های تجربی، صحت مدل طراحی شده در نرم افزار GT-power را نشان می دهد. عملکرد کنترل کننده ی پیشنهادی با کنترل کننده ی شرکت گاما تکنولوژی^۴ مقایسه شده است. نتایج بدست آمده، عملکرد مناسب کنترل کننده ی پیشنهادی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی

موتور اشتعال جرقه ای، دریچه گاز، ژنراتور، الگوریتم رقابت استعماری، GT-Power.

1 Combined Heat and Power

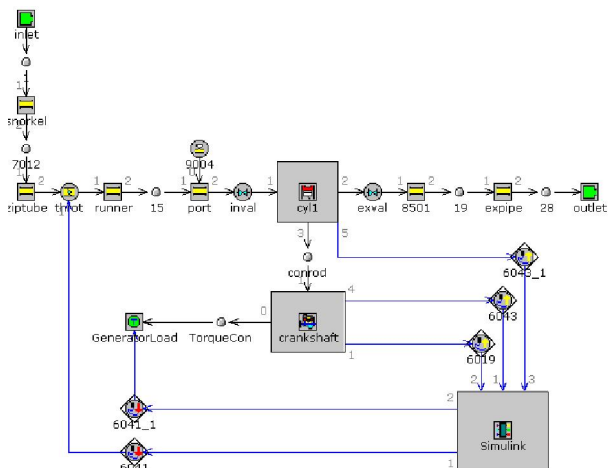
2 Simulink

3 Matlab

2. Proportional Integrator Differentiator

4. Gamma Technology

پورت‌های ورودی و خروجی سیال، انژکتورها و قسمت انتقال قدرت می‌باشد. مشخصات موتور مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

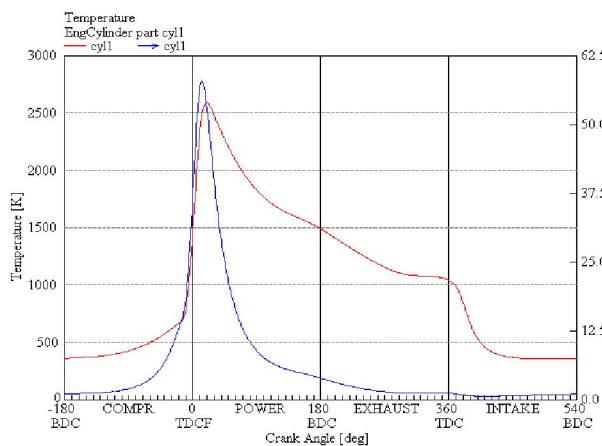


شکل ۱: مدل موتور در محیط GT-Power

جدول ۱: مشخصات موتور مورد بررسی

| چهار زمانه اشتعال جرقه‌ای | نوع موتور |
|------------------------------|------------------|
| ۱ | تعداد سیلندر |
| ۹۳ | قطر سیلندر (mm) |
| ۸۱ | کورس سیلندر (mm) |
| ۱۵۷ | طول شاتون (mm) |
| ۱۵ | نسبت سوخت به هوا |

از نتایج مهم این مدل‌سازی، نمودار فشار دما و نرخ آزادسازی انرژی و نمودار آلاینده‌گی (NOx) بر حسب زاویه لنگ می‌باشد که می‌تواند برای بهینه‌سازی محاسبه‌ی توان خروجی مورد استفاده قرار گیرد. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب مشخصه‌های دما و فشار، نرخ آزادسازی انرژی را بر حسب زاویه لنگ نشان می‌دهد و شکل ۴ مشخصه‌ی آلاینده‌گی (NOx) را در یک سیکل کامل نشان می‌دهد، که مطابق با نتایج تجربی موتورهای اشتعال جرقه‌ای است.



شکل ۲: نمودار فشار و دما بر حسب زاویه لنگ

تنظیم نسبت سوخت به هوا، تزریق سوخت و کنترل دریچه‌ی هوا، می‌توان کنترل دقیق‌تری بر موتور داشت. مصرف سوخت، کنترل سرعت موتور، رسیدن به حداکثر گشتاور و حداقل آلاینده‌گی از جمله پارامترهای مهمی هستند که در کنترل‌کننده‌های امروزی مورد توجه قرار می‌گیرند. تحقیقاتی که تاکنون انجام گرفته بیشتر در زمینه‌ی کنترل فرکانس و توان در توربین‌های گازی بوده است [۳]، [۴]. همچنین در مراجع [۵] و [۶] تحقیقاتی در زمینه‌ی کنترل دریچه‌ی هوا در موتورهای بنزینی و گازی در دور آرام صورت گرفته است. صفی‌خانی در مرجع [۷] در زمینه کنترل مد لغزشی دریچه‌ی گاز تحقیقی به انجام رسانده که در آن هدف صرفاً کنترل دریچه‌ی گاز بوده نه کنترل سرعت. همچنین شرکت گاما تکنولوژی از نرم افزار بهینه‌سازی Frontier جهت طراحی مناسب کنترل‌کننده‌ی دریچه‌ی گاز استفاده نموده است [۸].

در این مقاله هدف اصلی طراحی کنترل‌کننده‌ی سرعت موتور اشتعال جرقه‌ای جهت پایداری فرکانس برق تولیدی می‌باشد. بدین منظور کنترل کننده PID طراحی شده و ضرایب کنترل‌کننده توسط الگوریتم تکاملی رقابت استعماری بهینه‌سازی شده است تا بتواند میزان گشودگی دریچه‌ی هوا را طوری کنترل کند که به ازای بارهای مختلف و بارهای ناگهانی شبکه پایداری فرکانس برقرار شود. در خاتمه نتایج این مقاله با نتایج شرکت گاما تکنولوژی مقایسه می‌گردد.

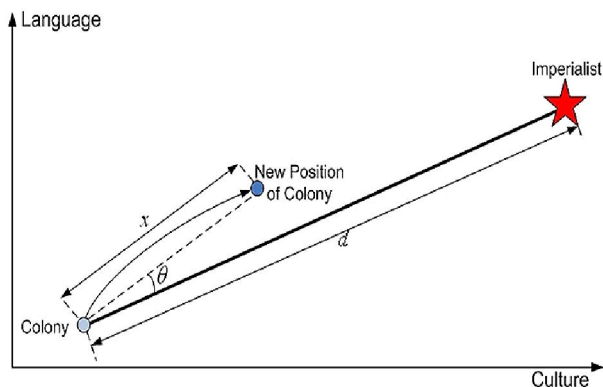
مدل‌سازی موتور

مدل‌های ریاضی بسیاری جهت تحلیل عملکرد چرخه‌های موتور تکامل یافته است. این مدل‌ها شامل مدل‌های احتراق، مدل‌سازی حرکت سیال داخل سیلندر و ورود و خروج جریان از سیلندر می‌باشد. بسیاری از محققان جهت ساده‌سازی تحقیق و بررسی چند پارامتر محدود از مدل‌های ریاضی ساده یا تقریبی استفاده می‌کنند. از طرف دیگر برای بررسی دقیق عملکرد موتور و شبیه‌سازی رفتار موتور، مدل‌های نرم‌افزاری توسعه یافته اند. نرم افزار GT-Power شرکت گاما تکنولوژی به عنوان ابزاری قدرتمند جهت بررسی و آنالیز بخش‌های مختلف موتور مورد توجه شرکت‌های سازنده این نوع موتورها و محققان قرار گرفته است [۹].

در این مقاله جهت شبیه‌سازی عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای از این نرم‌افزار استفاده می‌شود. شکل ۱ مدل موتور تک سیلندر اشتعال جرقه‌ای شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، مدل شبیه‌سازی شده شامل دریچه‌ی ورودی هوا، دریچه‌ی throttle، انژکتور، سوپاپ‌های ورودی و خروجی، سیلندر و دریچه خروجی گاز و قسمت CrankShaft جهت انتقال گشتاور تولیدی به ژنراتور می‌باشد.

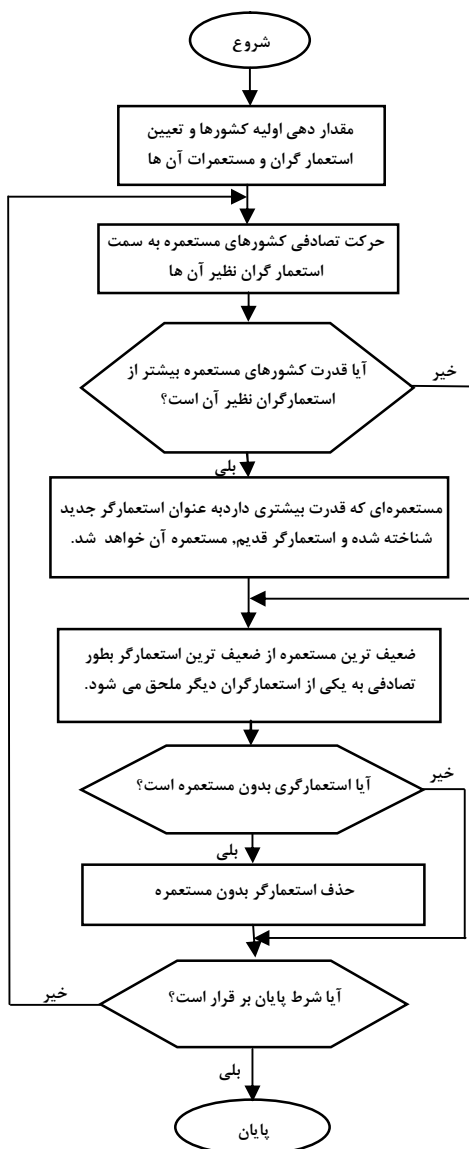
مدلسازی این نرم‌افزار بر اساس معرفی مشخصات هندسی و پارامترهای عملکردی موتور و بر اساس مدل‌سازی شبه بعدی ترمودینامیکی برای سیلندر و کلیه‌ی زیر سیستم‌های موتور شامل

جستجوی اطراف امپریالیست شده و کاهش آن نیز باعث می‌شود تا مستعمرات تا حد ممکن، به بردار واصل مستعمره به استعمارگر، نزدیک حرکت کنند. با در نظر گرفتن واحد رادیان برای θ ، عددی نزدیک به $\frac{\pi}{4}$ ، در اکثر پیاده‌سازی‌ها، انتخاب مناسبی بوده است.

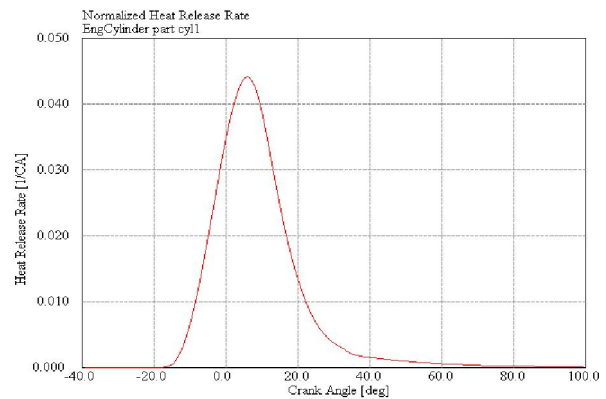


شکل ۵: حرکت کشور مستعمره به سمت کشور استعمارگر

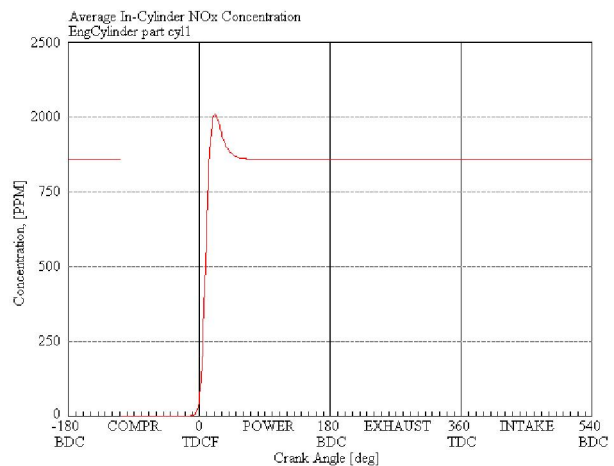
نمودار الگوریتم رقابت استعماری در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: نمودار الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۳: نمودار نرخ آزادسازی انرژی



شکل ۴: نمودار آلاینده‌گی (NOx)

الگوریتم رقابت استعماری

این الگوریتم با تعدادی کشور اولیه شروع می‌شود. کشورها به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ مستعمرات و کشورهای امپریالیست، که با هم تعدادی امپراطوری اولیه را تشکیل می‌دهند. رقابت میان امپراطوری‌ها، برای تصاحب مستعمرات همدیگر، هسته‌ی این الگوریتم را تشکیل می‌دهد و منجر به همگرایی کشورها، به کمینه مطلق تابع هزینه می‌شود. در طی این رقابت، امپراطوری‌های ضعیف، به تدریج، سقوط کرده و در نهایت یک امپراطوری باقی می‌ماند که کل دنیا را کنترل می‌کند [۱۰].

حرکت در فضای جستجو به این شکل می‌باشد که هر کشور در راستای کشوری که مستعمره آن است به صورت تصادفی حرکت می‌کند. به عنوان مثال اگر یک استعمارگر را با ستاره و کشور مستعمره آن را با دایره نشان دهیم حرکت کشور مستعمره به سمت کشور استعمارگر مطابق شکل ۵ خواهد شد [۱۱]. مقدار حرکت X و زاویه θ به طور تصادفی تعیین می‌گردد. معمولاً مقدار زاویه θ به طور یکنواخت در بازه $[-\gamma, \gamma]$ و مقدار حرکت X به طور یکنواخت در بازه $[0, \beta d]$ انجام می‌شود. که در آن β عددی بزرگتر از ۱ و نزدیک به ۲ می‌باشد یک انتخاب مناسب $\beta = 2$ می‌باشد وجود $\beta > 1$ باعث می‌شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر از جهت‌های مختلف به آن نزدیک شود و در رابطه γ پارامتری دلخواه می‌باشد که افزایش آن باعث افزایش

طراحی کنترل کننده

در این مقاله همانطور که اشاره شد تابع هزینه با توجه به بیشینه دور موتور و زمان نشست آن تعریف شده است و بصورت معادله (۵) در نظر گرفته شده است:

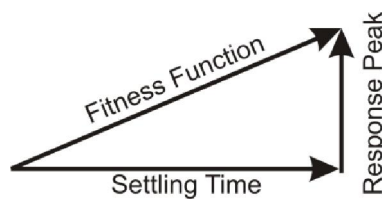
$$F = \sqrt{w(O_v^2) + S_t^2} \quad (۵)$$

که در رابطه (۵) :

O_v : بیشینه فراجش

S_t : زمان نشست

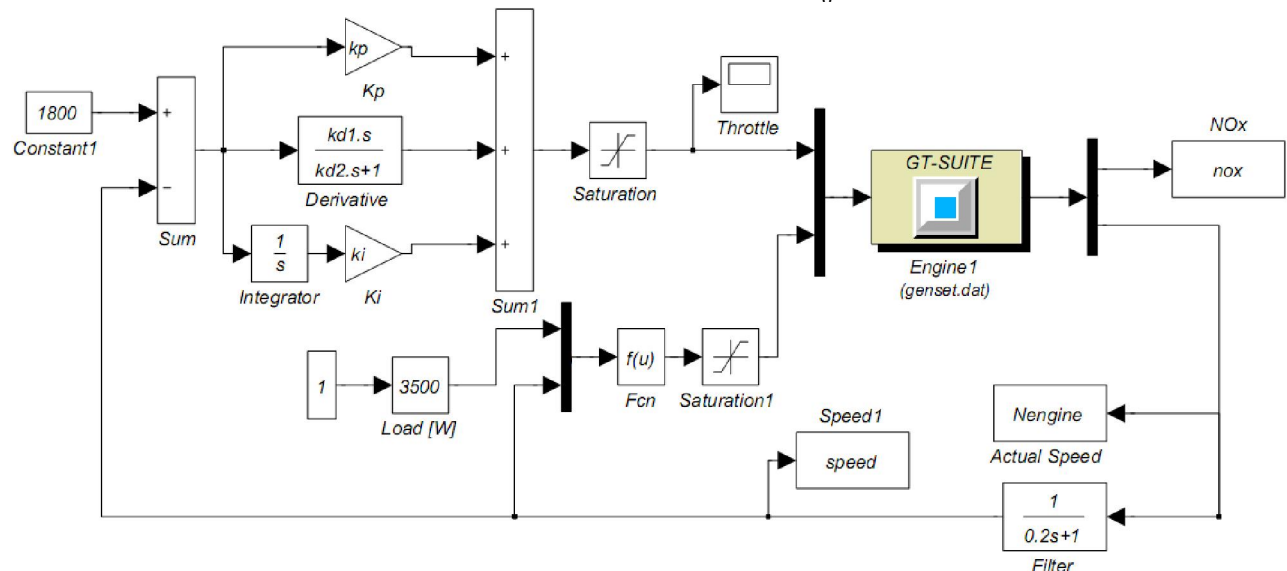
در ایده‌ی ارائه شده برای تابع هزینه هدف همچنان که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، زمان نشست و اوج پاسخ به صورت دو بردار عمود بر هم تصور شده‌اند. تابع هدف پیشنهادی اندازه مجموع این دو بردار را نشان می‌دهد. در تابع هدف جدید، جهت وزن دادن به جملات تابع هدف، پارامتر w به زمان نشست ضرب شده است.



شکل ۷: رابطه برداری $F = \sqrt{w(O_v^2) + S_t^2}$

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد نرم افزار GT-Suite، قابلیت کویل شدن این نرم‌افزار با سیمولینک نرم افزار متلب می‌باشد. شکل ۸ کنترل کننده‌ی طراحی شده در سیمولینک را نشان می‌دهد. همانطور که در بخش قبل مطرح شد، شبیه‌سازی موتور در نرم‌افزار GT-Suite صورت گرفته و کنترل کننده در محیط سیمولینک طراحی شده است.

در موتورهای اشتعال جرقه‌ای مقدار هوای ورودی به میفولد



شکل ۸: مدل سیمولینک کنترل کننده‌ی طراحی شده

کنترل کننده تناسبی - انتگرالی - مشتق گیر PID از دهه‌ی ۱۹۵۰ تاکنون، شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین مکانیزم فیدبک بوده و بطور وسیعی در کنترل پروسه‌های صنعتی مختلف، مورد استفاده قرار گرفته است. کنترل کننده‌ی PID بصورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (۱)$$

که K_p و K_i و K_d به ترتیب بهره تناسبی و انتگرالی و مشتق گیر کنترل کننده می‌باشد. دور موتور هر لحظه توسط سنسور اندازه‌گیری شده و به کنترل کننده داده می‌شود.

در طراحی کنترل کننده‌ی PID محققین توابع هدف مختلفی را در الگوریتم‌های تکاملی به کار برده‌اند. معمولاً متناظر با مقدار کمینه تابع هدف، مقادیر بهینه پارامترهای طراحی کنترل کننده بدست می‌آید. تابع هزینه به کار گرفته شده می‌تواند مبتنی بر حداقل سازی انتگرال قدر مطلق انحراف خطا^۶ (IAE)، انتگرال مربع انحراف خطا^۷ (ISE) و انتگرال حاصلضرب زمان در قدر مطلق انحراف خطا^۸ (ITAE) به ازای ورودیهای مختلف باشد. توابع هدف ISE، ITAE و IAE به صورت روابط (۲) تا (۴) محاسبه می‌شوند [۱۱].

$$S_1 = ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) \cdot d(t) \quad (۲)$$

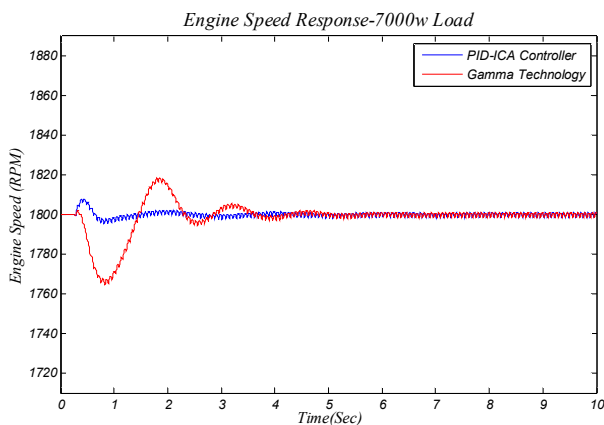
$$S_2 = ITAE = \int_0^{\infty} |e(t)| d(t) \quad (۳)$$

$$S_3 = IAE = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt \quad (۴)$$

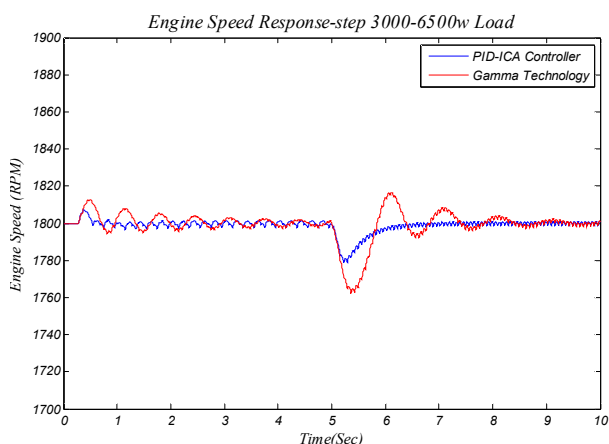
6 Integral of Absolute Error

7 Integral of Square Error

8 Integral of Time Multiplied Absolute Error



شکل ۱۰: مقایسه پایداری سرعت موتور در بار ۷۰۰۰ وات



شکل ۱۱: پایداری سرعت نسبت به تغییر بار از ۳۰۰۰ وات به ۶۵۰۰ وات

نتیجه‌گیری

مدلسازی دقیق موتور در نرم‌افزار GT-Power و قابلیت کوپل آن با نرم افزار متلب، امکان طراحی کنترل‌کننده‌ی دقیق را به منظور پایداری سرعت موتور فراهم آورده است. کنترل‌کننده‌ی طراحی شده، که ضرایب آن توسط الگوریتم رقابت استعماری بهینه‌سازی شده، نسبت به کنترل‌کننده‌ی طراحی شده توسط شرکت گاما تکنولوژی نتایج بهتری داشته است. انحراف از سرعت مرجع (RPM 1800) به ازای بار ثابت کمتر از 6 RPM و به ازای تغییر بار ناگهانی کمتر از RPM 13 می‌باشد. همچنین زمان نشست کاهش چشمگیری داشته است.

منابع

- [۱] باقرآبادی محمد، قهارپور، محمودرضا و سالک گیلانی نادر، ۱۳۸۶، "توسعه‌ی سیستم‌های تولید پراکنده CHP با استفاده از موتورهای گاز سوز (gas engine) با ایجاد مکانیزم جدید"، ششمین همایش ملی انرژی.
- [۲] میری مطلب، بیاتی غلامرضا، ۱۳۸۳، "مقدمه‌ای بر سیستم‌های تولید مشترک برق و حرارت"، سازمان بهره‌وری انرژی ایران.
- [۳] سخاوتی، آیدین، قره پتیان، گئورگ، حسینی، سید حسین، ۱۳۸۶، "بهبود کنترل‌کننده بار-فرکانس غیر متمرکز در سیستم‌های

ورودی و در نتیجه‌ی آن مقدار توان تولید شده به شدت به موقعیت دریچه‌ی گاز بستگی دارد. بنابراین به منظور تنظیم خودکار مقدار هوای ورودی به موتور از کنترل‌کننده‌های الکترونیکی جهت تنظیم دقیق زاویه‌ی گشودگی دریچه‌ی گاز استفاده می‌شود. در این مقاله هدف کنترل پایداری فرکانس برق تولیدی ژنراتور می‌باشد، به همین دلیل دور موتور باید در ۱۸۰۰ دور بر دقیقه ثابت باقی بماند.

اجرای الگوریتم و مقایسه‌ی نتایج

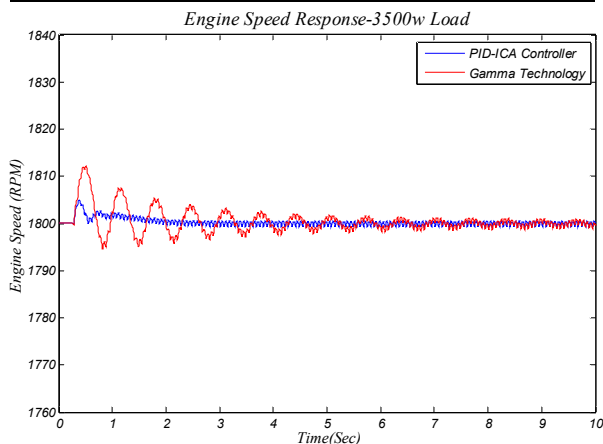
در این مقاله مدل موتور در نرم افزار GT-Suite و کنترل‌کننده در سیمولینک و پیاده سازی الگوریتم رقابت استعماری در نرم‌افزار متلب صورت گرفته است. ضرایب کنترل‌کننده‌ی PID به عنوان متغیرهای الگوریتم رقابت استعماری در نظر گرفته شده و تابع هزینه طوری طراحی شده است که زمان نشست و بیشینه‌ی فرجهش پاسخ سرعت موتور نسبت به بارهای مختلف و تغییرات بارها ناگهانی کمینه شود.

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نتایج حاصل با نتایج شرکت گاما تکنولوژی مقایسه شده است. نتایج حاصل عملکرد مطلوب کنترل‌کننده‌ی طراحی شده را نشان می‌دهد. جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی اعم از زمان نشست، بیشینه‌ی فرجهش و مقدار تابع هزینه را در سه حالت مورد بررسی، نشان می‌دهد.

شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودار پایداری سرعت موتور در توان ۳۵۰۰ وات و در بار کامل ژنراتور یعنی ۷۰۰۰ وات را نشان می‌دهد. همچنین جهت بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی نسبت به بارهای ناگهانی، تغییر بار ناگهانی از ۳۰۰۰ وات به ۶۵۰۰ وات بررسی شده است که شکل ۱۱ نتیجه‌ی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقایسه نتایج شبیه‌سازی

| تابع هزینه | زمان نشست | فراجهش | بار وارده بر موتور توسط ژنراتور |
|------------|-----------|--------|---------------------------------|
| 10,7 | ۱,۱۲ | ۵,۱ | توان ۳۵۰۰ |
| 13,96 | ۱,۰۸ | ۸,۵۶ | توان ۷۰۰۰ |
| 19,8 | ۱,۴۴ | ۱۲,۶ | ۳۵۰۰ به ۶۵۰۰ |



شکل ۹: مقایسه‌ی پایداری سرعت موتور در بار ۳۵۰۰ وات

دو ناحیه‌ای به روش جدید با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق ایران ۱۳۸۶.

[4] Master thesis, Lamberson, D.M, 2003. "Torque Management of Gasoline Engines". MSc Thesis, University of California at Berkeley.

[5] Yildiray Yildiz, Anuradha M. Annaswamy, Diana anakiev, 2011, " Spark Ignition Engine Idle Speed Control", IEEE Transaction on control systems technology, 19(5), August ,pp 990-1002.

[6] Hsieh, F, Chen, B.C and Wu, Y.Y, 2007, " Adaptive Idle Speed Control For Spark-Ignition Engines", paper number, 2007-01-1197, see also www.SAE.org.

[۷] صفی‌خانی علیرضا، الستی، آریا، شامخی، امیرحسین ۱۳۸۶، "طراحی کنترل ساختار متغیر مد لغزشی برای دریچه گاز برقی به منظور کاربرد آن در سامانه کنترل موتورهای افشانه‌ای" سومین همایش موتورهای درونسوز ۱۳۸۶.

[8] Gamma Technolgy, Estco, 2001, " Optimization of Automotive Control Parameters with FRONTIER", GT Suite conference .

[9] <http://www.gtisoft.com>

[۱۰] استراتژی بهینه سازی مبتنی بر تکامل اجتماعی سیاسی، اسماعیل آتش پز گرگری، «توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن»، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.

[۱۱] کاربرد الگوریتم رقابت استعماری برای انتخاب ویژگی در سیستم تشخیص چهره. محمدحسین سیگاری، کارو لوکس، قطب کنترل و پردازش هوشمند دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران.