

طراحی کنترل کننده PID ژنتیک دریچه‌ی گاز موتور اشتعال جرقه‌ای جهت پایداری فرکانس برق تولیدی ژنراتور

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

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، دانشکده مکانیک، gh_jafar@yhaoo.com
^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، گروه مکترونیک makan_arabi@yahoo.com
^۳ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، گروه مکترونیک m.dibagar@iaut.ac.ir
^۴ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، دانشکده برق lkhodadadi@iaut.ac.ir

چکیده

امروزه موتورهای اشتعال جرقه‌ای به عنوان محرک اصلی سیستم‌های تولید برق پراکنده بشمار می‌روند. پایداری فرکانس برق تولیدی ژنراتور در سیستم‌های قدرت از اهمیت بسیاری برخوردار است. از آنجاییکه پایداری فرکانس برق تولیدی وابسته به پایداری سرعت موتور محرک می‌باشد، کنترل سرعت موتور در این سیستم‌ها، امری ضروری است. در موتورهای اشتعال جرقه‌ای کنترل سرعت موتور، با تنظیم میزان هوای ورودی به سیلندر توسط دریچه‌ی گاز صورت می‌گیرد. امروزه کنترل کننده‌های الکترونیکی جهت تنظیم میزان گشودگی دریچه‌ی گاز استفاده می‌گردد.

در این مقاله مدلسازی موتور به کمک نرم‌افزار GT-Power صورت گرفته و طراحی کنترل کننده‌ی PID که ضرایب آن توسط الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شده در محیط سیمولینک نرم افزار متلب انجام می‌شود. انطباق نتایج مدلسازی موتور بر داده‌های تجربی، صحت مدل طراحی شده در نرم افزار GT-power را نشان می‌دهد. عملکرد کنترل کننده‌ی پیشنهادی با نتایج کنترل کننده‌ی شرکت گاما تکنولوژی مقایسه شده است. نتایج بدست آمده، عملکرد مناسب کنترل کننده‌ی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

موتور اشتعال جرقه‌ای، دریچه گاز، ژنراتور، الگوریتم ژنتیک، GT-Power.

مقدمه

توسعه‌ی ساخت نیروگاه‌های کوچک و توجه به مسائل زیست محیطی در دنیا باعث شده که مصرف کننده‌های انرژی و تولیدکننده‌های آن به سمت تجهیزات راندمان بالا رود. امروزه با پیشرفتی که در زمینه‌ی سیستم‌های CHP^۱ صورت گرفته با تولید همزمان برق و حرارت و سرمایه‌ی راندمان تولید به بالای ۸۵ درصد رسیده است [۱].

محرک اولیه که عمدتاً در سیستم‌های تولید همزمان (CHP) استفاده می‌شود عبارتند از توربین‌های بخار، توربین‌های گازی و موتورهای رفت و برگشتی، که در بین اینها موتورهای رفت و برگشتی به دلیل راندمان بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. محرک های گاز سوز از نوع اشتعال جرقه‌ای می‌باشند.

مسأله‌ی کنترل توان و فرکانس یکی از موضوعات اساسی در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت بوده و امروزه با توجه به گسترش ابعاد و تغییر ساختار و پیچیدگی سیستم‌های قدرت ضرورت آن بیش از پیش احساس می‌شود [۲].

موتور اشتعال جرقه‌ای وظیفه‌ی تأمین دور ثابت برای ژنراتور مورد استفاده جهت تولید توان با فرکانس و ولتاژ ثابت را بر عهده دارد. از این رو جهت کنترل دور موتور به ازای بارهای مختلف و بارهای ناگهانی که از طریق شبکه‌ی برق به ژنراتور وارد می‌شود، 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 می‌گرفت اما با گسترش کنترل کننده‌های الکترونیکی، با کنترل زمان جرقه، زمان باز و بسته شدن سوپاپ‌ها، تنظیم نسبت سوخت به هوا، تزریق سوخت و کنترل دریچه‌ی هوا، می‌توان کنترل دقیق تری بر موتور داشت. مصرف سوخت، کنترل سرعت موتور، رسیدن به حداکثر گشتاور و حداقل آلاینده‌ی از جمله پارامترهای مهمی هستند که در کنترل کننده‌های 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.

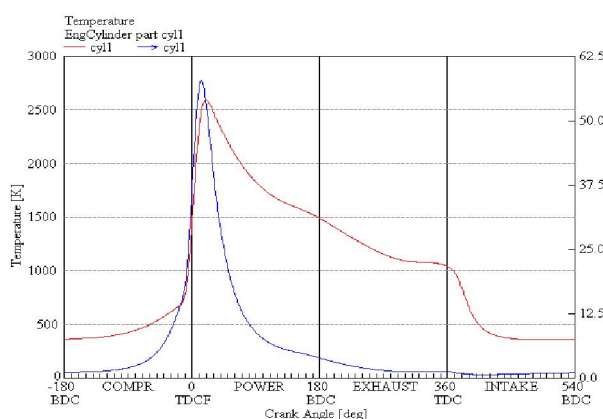
صفی‌خانی در مرجع [۷] در زمینه کنترل مد لغزشی دریچه‌ی گاز تحقیقی به انجام رسانده‌اند که در آن هدف صرفاً کنترل دریچه‌ی گاز بوده نه کنترل سرعت. همچنین شرکت گاما تکنولوژی^۲ از نرم افزار بهینه‌سازی Frontier جهت طراحی مناسب کنترل کننده‌ی دریچه‌ی گاز استفاده نموده‌اند [۸].

جدول ۱: مشخصات موتور مورد بررسی

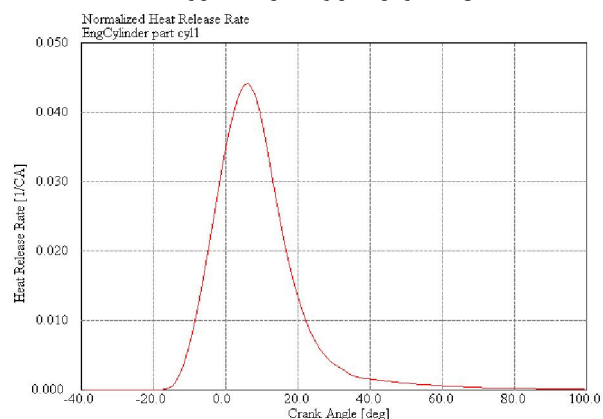
نوع موتور	چهار زمانه اشتعال جرقه‌ای
تعداد سیلندر	۱
قطر سیلندر (mm)	۹۳
کورس سیلندر (mm)	۸۱
طول شاتون (mm)	۱۵۷
نسبت سوخت به هوا	۱۵

از نتایج مهم این مدل‌سازی، نمودار فشار دما و نرخ آزادسازی انرژی 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 که مطابق با نتایج تجربی موتورهای اشتعال جرقه‌ای است.



شکل ۲: نمودار فشار و دما بر حسب زاویه لنگ



شکل ۳: نمودار نرخ آزادسازی انرژی

الگوریتم ژنتیک

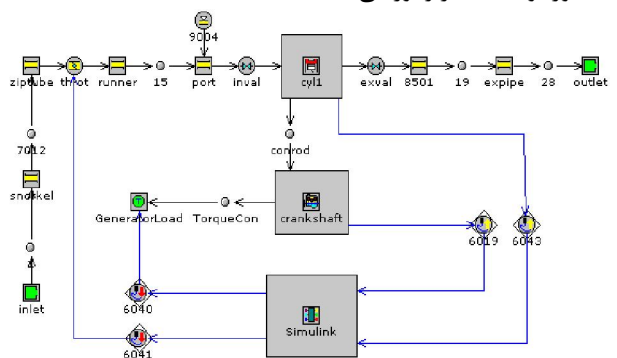
در الگوریتم ژنتیک، الگوریتم‌های جستجو از مکانیزم‌های انتخاب طبیعی الهام می‌گیرند. در الگوریتم ژنتیک مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی توسط رشته‌هایی با طول ثابت یا متغیر کدگذاری می‌شوند که در سیستم‌های بیولوژیکی آنها را کروموزم یا فرد می‌نامند. هر کروموزم از تعدادی متغیر طراحی، که می‌تواند بصورت اعشاری یا باینری باشد، تشکیل شده است که ژن نامیده می‌شوند. هر کروموزم،

در این مقاله هدف اصلی طراحی کنترل‌کننده‌ی سرعت موتور اشتعال جرقه‌ای جهت پایداری فرکانس برق تولیدی می‌باشد. بدین منظور کنترل‌کننده PID^۳ طراحی شده و ضرایب کنترل‌کننده توسط الگوریتم تکاملی ژنتیک 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.



شکل ۱: مدل موتور در محیط GT-Power

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

مشق گیر کنترل کننده می باشد. دور موتور هر لحظه توسط سنسور اندازه گیری شده و به کنترل کننده داده می شود.

یکی از ویژگی های منحصر به فرد نرم افزار GT-Suite، قابلیت کوپل شدن این نرم افزار با سمولینک نرم افزار متلب می باشد. همانطور که در بخش قبل مطرح شد، شبیه سازی موتور در نرم افزار GT-Suite صورت گرفته است و کنترل کننده در محیط سمولینک طراحی شده است.

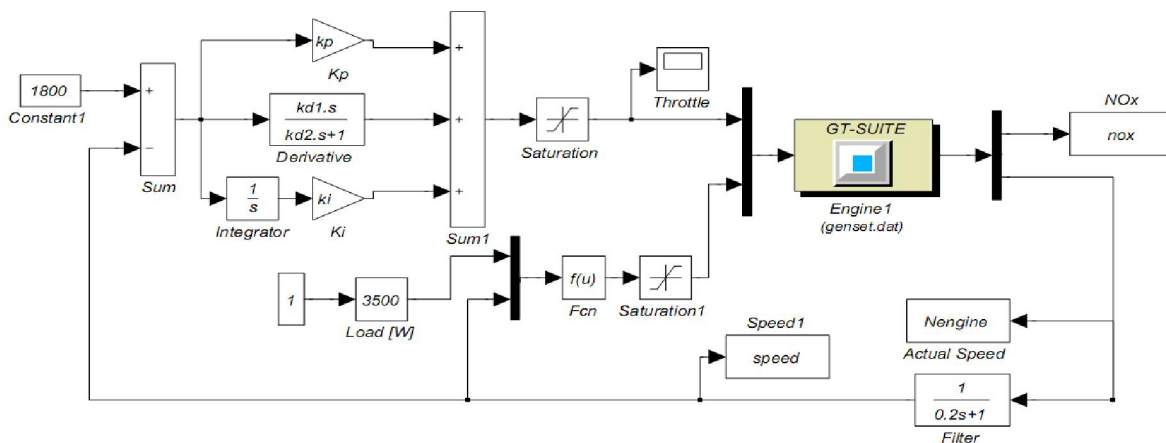
در موتورهای اشتعال جرقه ای مقدار هوای ورودی به منیفولد ورودی و در نتیجه ی آن مقدار توان تولید شده به شدت به موقعیت دریچه ی گاز بستگی دارد. بنابراین به منظور تنظیم خودکار مقدار هوای ورودی به موتور از کنترل کننده های الکترونیکی جهت تنظیم دقیق زاویه ی گشودگی دریچه ی گاز استفاده می شود.

در این مقاله هدف کنترل پایداری فرکانس برق تولیدی ژنراتور می باشد، به همین دلیل دور موتور باید در ۱۸۰۰ دور بر دقیقه ثابت باقی بماند. شکل ۴ کنترل کننده ی طراحی شده در سمولینک را نشان می دهد.

اجرای الگوریتم و مقایسه ی نتایج

در این مقاله مدل موتور در نرم افزار GT-Suite و کنترل کننده در سمولینک و پیاده سازی الگوریتم ژنتیک در نرم افزار متلب صورت گرفته است. ضرایب کنترل کننده ی PID به عنوان متغیرهای الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده و تابع هزینه طوری طراحی شده است که زمان نشست و بیشینه ی فراجش پاسخ سرعت موتور نسبت به بارهای مختلف و تغییرات بارها ناگهانی کمینه شود. در شکل های ۵ تا ۷ نتایج حاصل با نتایج شرکت گاما تکنولوژی مقایسه شده است. نتایج حاصل عملکرد مطلوب کنترل کننده ی طراحی شده را نشان می دهد.

شکل ۵ و ۶ به ترتیب نمودار پایداری سرعت موتور در توان ۳۵۰۰ وات و در بار کامل ژنراتور یعنی ۷۰۰۰ وات را نشان می دهد. همچنین جهت بررسی عملکرد کنترل کننده ی پیشنهادی نسبت به بارهای ناگهانی، تغییر بار ناگهانی از ۳۵۰۰ وات به ۶۵۰۰ وات بررسی شده است. شکل ۷ نتیجه ی شبیه سازی را نشان می دهد.



شکل ۴: مدل سمولینک کنترل کننده ی طراحی شده

یک نقطه پاسخ در فضای جستجو را نشان می دهد. الگوریتم های وراثتی فرایندهایی تکراری می باشند که هر مرحله ی تکراری را نسل و مجموعه ی پاسخ ها در هر نسل را جمعیت نام نهاده اند. این الگوریتم ها با تولید نسل آغاز می شوند، بدین صورت که جمعیت اولیه بصورت تصادفی یا انتخابی از بین فضای جستجو انتخاب می شود. الگوریتم ژنتیک بر هدایت عملیات جستجو به طرف نقاط بهینه از روش های آماری بهره می برد. در فرایند انتخاب طبیعی، جمعیت موجود به تناسب برازندگی افراد آن، برای نسل بعد انتخاب می شود. سپس عملگرهای ژنتیکی شامل انتخاب، پیوند، جهش و دیگر عملگرهای احتمالی اعمال می شوند و جمعیت جدید بوجود می آید. جمعیت جدید جایگزین جمعیت پیشین می شود و این چرخه ادامه می یابد. معمولا جمعیت جدید برازندگی بیشتری نسبت به جمعیت قبلی دارد. جمعیت جدید جایگزین بدان معنی است که از نسلی به نسل بعد برازندگی بهبود می یابد. هنگامی جستجو نتیجه بخش خواهد بود که به حداکثر نسل مورد نظر رسیده باشد یا همگرایی حاصل شود یا به عبارتی دیگر معیارهای توقف برآورده گردد. معمولا شرط توقف به صورت تعداد تکرار ثابت نسل تعریف می شود یا اینکه جمعیت از حد معینی یکنواخت تر گردد.

الگوریتم ژنتیک برای جستجوی موثر، فقط به مقادیر تابع هدف نیاز دارد و دانسته های از پیش تعیین شده را نادیده می گیرند. به همین دلیل اینگونه الگوریتم ها نسبت به دیگر روش های جستجو، روش های مناسبتری جلوه می کنند.

طراحی کنترل کننده

کنترل کننده تناسبی - انتگرالی - مشتق گیر PID از دهه ی ۱۹۵۰ تاکنون، شناخته شده ترین و پرکاربردترین مکانیزم فیدبک بوده و بطور وسیعی در کنترل پروسه های صنعتی مختلف، مورد استفاده قرار گرفته است.

کنترل کننده ی PID بصورت رابطه ی (۱) تعریف می شود:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

که K_p و K_i و K_d به ترتیب بهره تناسبی و انتگرالی و

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 ژنتیک بهینه‌سازی شده است، نسبت به کنترل‌کننده‌ی طراحی شده توسط شرکت گاما تکنولوژی نتایج بهتری داشته است. انحراف از سرعت مرجع (1800 RPM) به ازای بار ثابت کمتر از 5 RPM و به ازای تغییر بار ناگهانی کمتر از 12 RPM می‌باشد. همچنین زمان نشست کاهش چشمگیری داشته است.

مراجع

[۱] باقرآبادی محمد، قهارپور، محمودرضا و سالک گیلانی نادر، ۱۳۸۶، "توسعه‌ی سیستم‌های تولید پراکنده با استفاده از موتورهای گاز سوز (gas engine) با ایجاد مکانیزم جدید"، ششمین همایش ملی انرژی.

[۲] مطلب، غلامرضا میری، محمد حسن زربخش، ۱۳۸۳، "مقدمه‌ای بر سیستم‌های تولید مشترک برق و حرارت"، سازمان بهره‌وری انرژی ایران.

[۳] سخاوتی، آیدین، قره پتینان، گئورگ، حسینی، سید حسین، ۱۳۸۶، "بهبود کنترل‌کننده بار-فرکانس غیر متمرکز در سیستم‌های دو ناحیه‌ای به روش جدید با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق ایران ۱۳۸۶.

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

[۵] 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.

[۶] 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.

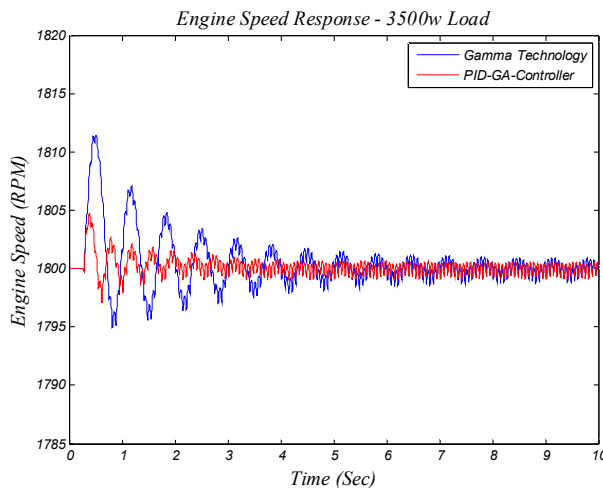
[۷] صفی‌خانی علیرضا، الستی، آریا، شامخی، امیرحسین ۱۳۸۶، "طراحی کنترل ساختارمتغیر مد لغزشی برای دریچه گاز برقی به منظور کاربرد آن در سامانه کنترل موتورهای افشانه‌ای" سومین همایش موتورهای درونسوز ۱۳۸۶.

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

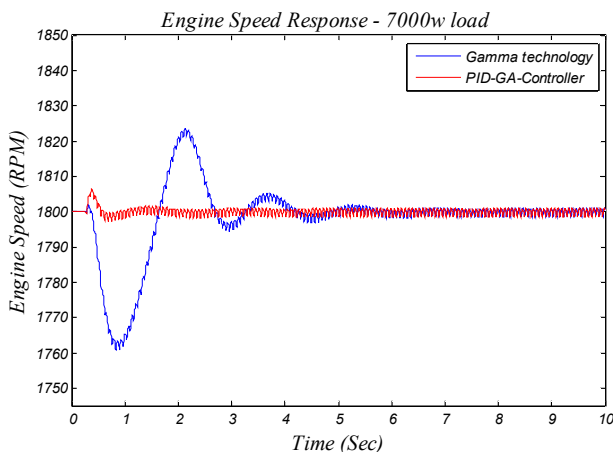
[9] <http://www.gtisoft.com>

جدول ۲: مقایسه نتایج شبیه‌سازی در توان ۳۵۰۰

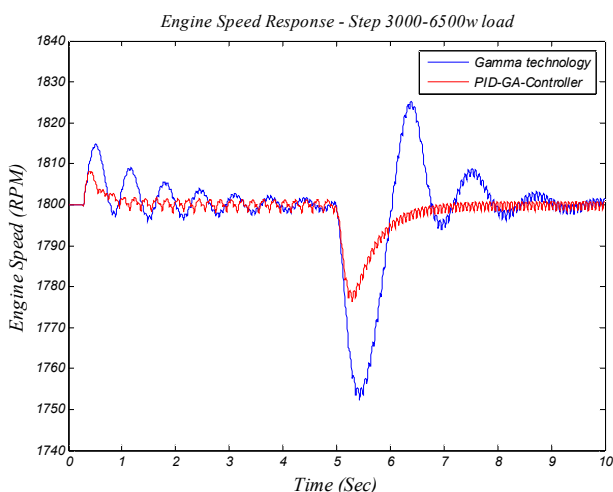
تابع هزینه	زمان نشست	فراجهش	بار وارده بر موتور توسط ژنراتور
۸,۶۹	۱,۰۹	۴,۶	توان ۳۵۰۰
۱۰,۹۸	۰,۹۷	۷,۱	توان ۷۰۰۰
۱۹	۱,۴	۱۳,۴	۳۵۰۰ به ۶۵۰۰



شکل ۵: مقایسه‌ی پایداری سرعت موتور در بار ۳۵۰۰ وات



شکل ۶: مقایسه پایداری سرعت موتور در بار ۷۰۰۰ وات



شکل ۷: پایداری سرعت نسبت به تغییر بار از ۳۵۰۰ وات به ۶۵۰۰ وات