



## طراحی یک شبیه‌سازِ بلادرنگ برای مجموعه موتور احتراقی- ژنراتور در اتوبوس هیبرید الکتریکی سری

محمدجواد اسفندیاری<sup>۱</sup>، محمدرضا حائری یزدی<sup>۲</sup>، وحید اصفهانیان<sup>۳\*</sup>، حسن نهضتی<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

۳- استاد، مهندسی مکانیک، پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

\*evahid@ut.ac.ir، صندوق پستی ۱۳۳۵ - ۱۴۳۹۵، پست الکترونیکی

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۳ آبان ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۰ آذر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۱۹ خرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:

هیبرید الکتریکی

شبیه‌ساز

سخت‌افزار در حلقه

واحد کنترل خودرو

در این مقاله یک شبیه‌ساز بی‌درنگ برای مجموعه موتور احتراقی- ژنراتور در یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری طراحی شده است که برای تست عملکرد واحد کنترل خودرو در بستر تست سخت‌افزار در حلقه استفاده خواهد شد. به عنوان یک گام مهم در جهت استفاده از شبیه‌ساز در بستر تست سخت‌افزار در حلقه، پیام‌های ارسالی از واحد کنترل خودرو به مجموعه دیزل- ژنراتور شناسایی شده‌اند و طراحی شبیه‌ساز براساس این ورودی‌ها و با در نظر گرفتن رفتار دینامیکی اجزاء انجام شده است. با توجه به این‌که مجموعه دیزل- ژنراتور مبنای دور یا گشتاور از واحد کنترل خودرو دریافت می‌کند، دو کنترلر PID طراحی شده‌اند که مجموعه را به دور درخواستی از واحد کنترل می‌رساند. با اعمال ورودی‌های مناسب، شرایط عملکردی مختلف برای مجموعه دیزل- ژنراتور شبیه‌سازی شده‌اند که از جمله آن، فرآیند روشن شدن نرم و عملکرد پایای مجموعه دیزل- ژنراتور است. امکان ارتباط با سخت‌افزار مستلزم انجام شبیه‌سازی به شکل بی‌درنگ است. بدین‌منظور طراحی شبیه‌ساز در محیط نرم‌افزار لب‌ویو و به شکل بی‌درنگ انجام شده است و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از تست‌های تجربی نشان می‌دهد که شبیه‌ساز طراحی شده در پاسخ به ورودی‌های مختلف رفتار قابل قبولی را از خود نشان می‌دهد.

## Design of a Real-time Simulator of the Engine-Generator for a Series Hybrid Electric Bus

Mohammad Javad Esfandyari<sup>1</sup>, Mohammad Reza Ha'iri Yazdi<sup>2</sup>, Vahid Esfahanian<sup>3\*</sup>, Hassan Nehzati<sup>1</sup>

1- Vehicle, Fuel and Environment Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran

2- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Vehicle, Fuel and Environment Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran

\*P.O.B. 14395- 1335, Tehran, evahid@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 04 November 2013  
Accepted 11 December 2013  
Available Online 09 June 2014

**Keywords:**  
Hybrid Electric  
Simulator  
Hardware-in-the-Loop  
Vehicle Control Unit

### ABSTRACT

In this paper, a real time simulator of the engine-generator for a series hybrid electric bus is designed which can be used for hardware in the loop testing of the hybrid bus control unit. As an important step for designing a hardware in the loop simulator, messages that the engine and generator receive from the vehicle control unit are identified. Design of the simulator is based on these received messages and dynamic behavior of the components. Since the engine and generator receive speed or torque commands from the vehicle control unit, two PID controllers are designed to bring the engine or generator to the desired speed. By applying appropriate inputs, different modes of operation of the diesel-generator is simulated including the soft start process and steady state operation. For a simulator, the ability to interface with a real hardware requires a real time simulation. To do so, the design process is implemented in LabVIEW environment and results show that the designed simulator gives responses close to real test results and it is suitable for developing the hybrid vehicle control unit.

### ۱- مقدمه

مانند اتوبوس‌ها، نسبت به خودروهای سواری ضروری‌تر به نظر می‌رسد؛ بنابراین، انجام تحقیقات بر اتوبوس‌های هیبرید به‌عنوان یک گام ضروری برای کنترل روند رو به رشد استفاده بی‌رویه از منابع سوخت‌های فسیلی و گرم شدن کره زمین است. با توجه به این‌که در خودروهای هیبرید بیش از یک منبع تولید انرژی

امروزه تکنولوژی خودروهای هیبرید به عنوان راه‌کاری مؤثر در کاهش مصرف سوخت و همچنین کاهش آلاینده‌ها در صنعت خودروسازی مورد توجه است. استفاده از هیبریدسازی برای کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش آلاینده‌های خروجی در خودروهای سنگین که مصرف سوخت زیادی دارند،

Please cite this article using:

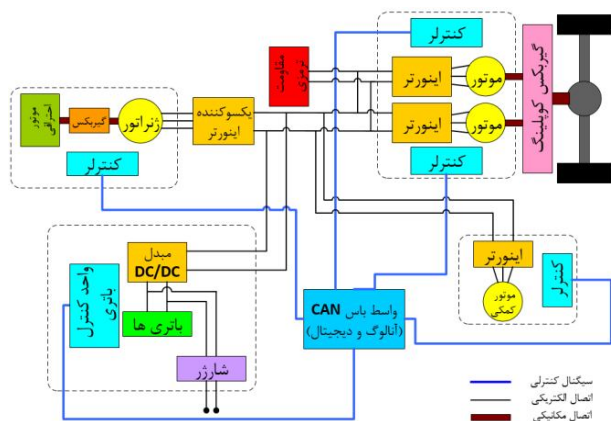
M.J. Esfandyari, M.R. Ha'iri Yazdi, V. Esfahanian, H. Nehzati, Design of a Real-time Simulator of the Engine-Generator for a Series Hybrid Electric Bus, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 200-206, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

وجود دارد، بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش آلایندگی‌ها در این خودروها وابستگی زیادی به نحوه مدیریت این منابع انرژی دارد؛ بنابراین واحد کنترل در این خودروها که کنترل توزیع توان مورد نیاز قسمت‌های مختلف خودرو از وظایف این قسمت است از این جهت نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. واحد کنترل مرکزی در خودروی هیبرید با هدف ایجاد شرایط کارکرد بهینه برای موتور احتراقی با ارسال پیام‌هایی عملکرد مجموعه موتور احتراقی- ژنراتور را در شرایط کاری مختلف کنترل می‌کند [۱].

**۲- مجموعه موتور احتراقی- ژنراتور در اتوبوس هیبرید الکتریکی سری**  
شکل ۱ ساختار کلی و ارتباط بین اجزاء مختلف را در اتوبوس هیبرید ساخته شده در پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران نشان می‌دهد. ارتباط بین قسمت‌های مختلف اتوبوس از طریق پروتکل ارتباطی CAN صورت می‌پذیرد. در ساختار هیبرید سری، منبع اصلی تولید توان، مجموعه موتور احتراقی و ژنراتور است که در آن توان مکانیکی ایجاد شده توسط موتور احتراقی از طریق ژنراتور به توان الکتریکی تبدیل شده و به شکل مستقیم یا غیرمستقیم (از طریق باتری) توان مورد نیاز موتورهای الکتریکی را تأمین می‌کند. این قسمت در اتوبوس هیبرید شامل موتور احتراق داخلی به همراه کنترلر موتور، ژنراتور به همراه اینورتر مربوطه و یک گیربکس تک‌سرته است. موتور احتراقی مورد استفاده در اتوبوس هیبرید از نوع دیزل با توان ۱۳۰ کیلووات و ژنراتور مورد استفاده از نوع مغناطیسی دائم با توان ۱۳۵ کیلووات است که می‌تواند در حالت موتوری نیز کار کند. اینورتر وظیفه تبدیل ولتاژ متناوب به ولتاژ مستقیم و بالعکس و همچنین کنترل ژنراتور را بر عهده دارد. جدول ۱ مشخصات اجزا سیستم تولید قدرت را نشان می‌دهد.

واحد کنترل مرکزی وظیفه کنترل عملکرد تمامی قسمت‌های خودرو را بر عهده دارد و این کار را از راه ارسال پیام‌های مختلف به واحد کنترل مربوط به هر قسمت انجام می‌دهد. به عبارت دیگر، واحد کنترل مرکزی با دریافت پیام‌های مربوط به هر قسمت که بیان‌گر وضعیت کارکرد آن قسمت است، کنترل‌های لازم را با ارسال فرامین مختلف انجام می‌دهد. واحد کنترل مربوط به هر قسمت وظیفه ترجمه و اعمال فرمان دریافتی از واحد کنترل مرکزی را دارد. با توجه به استراتژی کنترل مورد استفاده در واحد کنترل مرکزی، فرمان روشن یا خاموش شدن مجموعه موتور احتراقی- ژنراتور صادر می‌شود. موتور دیزل و ژنراتور بسته به حالت کنترلی خود، فرمان دور یا گشتاور را از واحد کنترل مرکزی دریافت می‌کنند. به عبارت دیگر، واحد کنترل مرکزی با هدف ایجاد شرایط کارکرد بهینه برای موتور احتراقی با ارسال پیام‌هایی عملکرد مجموعه موتور احتراقی- ژنراتور را در شرایط کاری مختلف کنترل می‌کند.



شکل ۱ نمایی از چیدمان اجزاء مختلف و ارتباط بین آن‌ها در اتوبوس هیبرید

شبیه‌سازی ساختار در حلقه<sup>۱</sup> استفاده‌های بسیاری در طراحی، کالبراسیون و صحت‌گذاری عملکرد نمونه‌های نخستین ساخته شده از کنترلرها داشته است که با در ارتباط قرار دادن آن‌ها با مدلی از سایر قسمت‌های سیستم کنترلی صورت می‌پذیرد [۲]. با توجه به پیچیدگی‌هایی که در واحد کنترلی خودروهای هیبرید وجود دارد، استفاده از شبیه‌سازی ساختار در حلقه در توسعه سیستم‌های کنترلی مورد استفاده در این خودروها در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. در سال ۲۰۰۴ شرکت ویستین<sup>۲</sup> یک سیستم شبیه‌سازی ساختار در حلقه را پیاده‌سازی کرد که از آن برای تست عملکرد ماژول کنترل زنجیره قدرت استفاده کرد [۳]. با توجه به پیچیدگی‌هایی که در این ماژول وجود دارد، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی ساختار در حلقه، خطاها و اختلاف با حالت مطلوب در کم‌ترین زمان ممکن در فاز تست و توسعه مشخص شده و رفع شدند. همچنین شرکت فورد<sup>۳</sup> تست ساختار در حلقه را بر واحد کنترل الکترونیکی یک خودرو هیبرید الکتریکی انجام داد [۴]. در [۱] و [۵]، از تست ساختار در حلقه برای صحت‌گذاری عملکرد استراتژی کنترل طراحی شده برای خودروی هیبرید استفاده شده است.

نخستین گام در انجام شبیه‌سازی ساختار در حلقه، طراحی یک شبیه‌ساز از قسمت‌هایی از سیستم است که باید در ارتباط با ساختار مورد نظر قرار بگیرد [۲-۶]. بنابراین لازم است پیام‌های ارسالی از ساختار به شبیه‌ساز شناسایی شده و طراحی شبیه‌ساز براساس این پیام‌ها باشد. در این مقاله یک شبیه‌ساز بلادرنگ<sup>۴</sup> برای مجموعه موتور احتراقی- ژنراتور در یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری طراحی شده است که قابلیت استفاده در تست‌های نرم‌افزار در حلقه<sup>۵</sup> و ساختار در حلقه را دارد. این شبیه‌ساز با هدف تست بخشی از الگوریتم‌های کنترلی مورد استفاده در واحد کنترل مرکزی اتوبوس هیبرید الکتریکی طراحی شده است که این الگوریتم‌ها برای کنترل عملکرد مجموعه موتور احتراقی- ژنراتور پیاده‌سازی شده و امکان ارتباط با ساختار واقعی در بستر تست ساختار در حلقه، مستلزم انجام شبیه‌سازی به شکل بلادرنگ است. در این تحقیق بر خلاف تحقیقات یاد شده در زمینه شبیه‌سازی ساختار در حلقه، شبیه‌سازی بلادرنگ بدون نیاز به ساختار خارجی انجام شده است و شبیه‌ساز طراحی شده در رایانه‌های تحت ویندوز نیز قابل اجرا است. از این‌رو، هزینه و زمان انجام تست ساختار در حلقه کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار لَب‌ویو<sup>۶</sup> انجام شده است [۷] چرا که این نرم‌افزار علاوه بر قابلیت شبیه‌سازی بلادرنگ، امکان ارتباط با پروتکل ارتباطی CAN<sup>۷</sup> را نیز دارد. خودروی هیبرید مورد نظر یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری است که مراحل طراحی و ساخت آن در پژوهشکده خودرو،

- 1- Hardware-in-the-Loop simulation
- 2- Visteon
- 3- Ford
- 4- Real-time
- 5- Software-in-the-Loop
- 6- Lab VIEW
- 7- Controller area network

گشتاور منفی مربوط به اتلافات موجود در موتور است؛ بنابراین، معادله (۱) به شکل زیر در می‌آید:

$$T_{eng} + \frac{rT_{gen}}{\eta_g} = I_{eq}\alpha_{eng} \quad (2)$$

که در معادله (۲)،  $r$  نسبت دنده گیربکس و  $\eta_g$  راندمان مربوط به آن است. لازم به یاد است که  $T_{eng}$  و  $T_{gen}$  می‌توانند مقادیر مثبت یا منفی اختیار کنند. برای محاسبه ممان اینرسی معادل مجموعه از سمت موتور احتراقی، از انرژی جنبشی مجموعه استفاده می‌شود:

$$K.E. = \frac{1}{2}I_{eq}\omega_{eng}^2 = \frac{1}{2}(I_{eng} + I_{g1})\omega_{eng}^2 + \frac{1}{2}(I_{gen} + I_{g2})\omega_{gen}^2 \quad (3)$$

با استفاده از نسبت سرعت بین موتور احتراقی و ژنراتور ممان اینرسی معادل برابر است با:

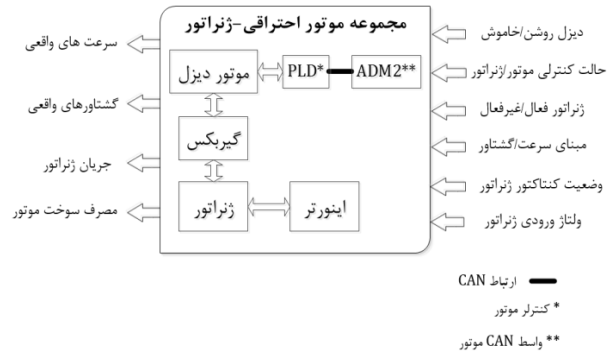
$$I_{eq} = I_{eng} + I_{g1} + r^2(I_{gen} + I_{g2}); r = \frac{\omega_{gen}}{\omega_{eng}} \quad (4)$$

که در معادله (۴)،  $I_{g1}$  و  $I_{g2}$  به ترتیب ممان‌های اینرسی چرخنده‌های متصل به ژنراتور و موتور احتراقی هستند. موتور احتراقی و ژنراتور با توجه به وضعیت کنترلی خود می‌توانند مبنای سرعت یا گشتاور بگیرند. در واقعیت به دلیل وجود یک گیربکس تک‌سرعت بین موتور و ژنراتور، نمی‌توان به آن‌ها مبنایی از یک جنس (دور یا گشتاور) اعمال کرد، بدین معنی که اگر یکی از اجزا مبنای دور دریافت کرد، دیگری مبنای گشتاور دریافت می‌کند و برعکس.

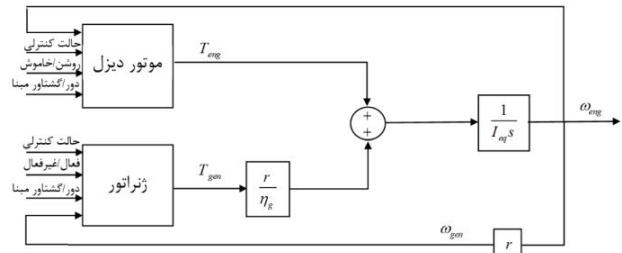
برای انجام شبیه‌سازی به شکل بلادرنگ، سرعت پردازش اطلاعات باید به قدر کافی زیاد باشد و بنابراین مدل طراحی شده باید تا حد ممکن ساده باشد [۸]. بدین منظور طراحی این شبیه‌ساز با توجه به ورودی/خروجی‌ها و متناسب با دقت مورد نیاز برای استفاده در تست سخت‌افزار در حلقه طراحی شده و با استفاده از قابلیت‌های محیط نرم‌افزار لب‌ویو، تعداد دفعات تکرار حل معادلات در هر ثانیه به منظور دستیابی به شبیه‌سازی بلادرنگ کنترل شده است [۷]. طراحی مدلی که بتواند رفتارهای دینامیکی موتور احتراقی و ژنراتور را دقیقاً نشان دهد و به قدر کافی سرعت پردازش بالایی داشته باشد دشوار است. بدین منظور برای شبیه‌سازی گشتاور حاصل از احتراق در موتور احتراقی و همچنین گشتاور خروجی ژنراتور در حالتی که مبنای سرعت دریافت می‌کنند، یک حلقه کنترلی شامل یک کنترلر PID طراحی شده است که ورودی آن خطای موجود در دور و خروجی آن گشتاور آن عضو است. بلوک دیاگرام سیستم کنترلی مربوطه در شکل ۳ نشان داده شده است. برای اعمال گشتاور منفی ناشی از اتلاف‌های موجود در موتور احتراقی از منحنی‌های شرکت سازنده استفاده شده است که توان اتلافی را بر حسب دور موتور در اختیار قرار می‌دهد.

برای اعمال تأخیر در رسیدن به مقدار گشتاور حاصل از کنترلر، از توابع تبدیل مرتبه اول با ثوابت زمانی  $0.1$  و  $0.5$  به ترتیب برای موتور احتراقی و ژنراتور استفاده شده است. ضرایب کنترلرهای طراحی شده برای موتور احتراقی و ژنراتور در جدول ۲ آمده است. در موتور احتراقی، با توجه به این‌که طراحی کنترلر PID که برای تمام حالات عملکرد خوبی داشته باشد قابل حصول نبود، بسته به مثبت یا منفی بودن مبنای گشتاور در ژنراتور دو رابطه برای کنترلر در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که اشاره شد، در تحقیق حاضر استفاده از مدل‌هایی که تا حد ممکن ساده هستند مد نظر است. از این رو جریان الکتریکی ژنراتور با فرض راندمان ثابت برای آن محاسبه شده است. با توجه به این‌که ژنراتور می‌تواند در حالت موتوری هم کار کند، بنابراین اندازه جریان الکتریکی از روابط زیر به دست می‌آید:



شکل ۲ مجموعه موتور-ژنراتور و ورودی/خروجی‌های آن



شکل ۳ بلوک دیاگرام مجموعه موتور احتراقی-ژنراتور

جدول ۱ مشخصات سیستم تولید توان در اتوبوس هیبرید

سیستم تولید توان	
موتور احتراق داخلی	قدرت موتور: ۱۳۰ کیلو وات تعداد و آرایش سیلندرها: ۴ خطی اینرسی: ۱/۴۴ کیلوگرم- مترمربع نسبت دنده: ۲/۴۲ راندمان: ۰/۹۵
گیربکس افزایشنده	اینرسی: ۰/۰۰۲ کیلوگرم- مترمربع توان نامی: ۱۳۵ کیلو وات راندمان: ۰/۹
ژنراتور	اینرسی: ۰/۰۸۴ کیلوگرم- مترمربع

برای طراحی یک شبیه‌ساز از مجموعه موتور احتراقی-ژنراتور که قابلیت استفاده در تست‌های نرم‌افزار در حلقه و سخت‌افزار در حلقه را داشته باشد، شناخت ورودی و خروجی‌های این مجموعه حائز اهمیت است. شکل ۲ اجزاء مختلف مجموعه موتور احتراقی-ژنراتور و ورودی و خروجی‌های مربوط به این قسمت را نشان می‌دهد.

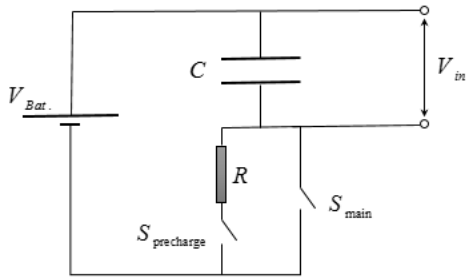
همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شبیه‌ساز طراحی شده با دریافت ورودی‌های گشتاور یا سرعت مبنای، وضعیت کنترلی هر کدام از اجزاء روشن یا خاموش بودن آن‌ها و همچنین وضعیت کنتاکتور ژنراتور و ولتاژ ورودی آن، باید مقادیر سرعت و گشتاورهای واقعی اجزاء، جریان مصرفی یا تولیدی موتور/ژنراتور و مصرف سوخت موتور احتراقی را محاسبه کند.

### ۳- شبیه‌ساز مجموعه موتور احتراقی-ژنراتور

معادله دینامیک حاکم بر مجموعه تولید قدرت به شکل زیر است:

$$\sum T = I_{eq}\alpha \quad (1)$$

که در معادله (۱)،  $I_{eq}$  ممان اینرسی معادل و  $\alpha$  شتاب زاویه‌ای است. سمت چپ معادله بالا شامل دو جمله است: یکی گشتاور مربوط به ژنراتور و دیگری گشتاور مربوط به موتور احتراقی است. گشتاور خروجی موتور احتراقی از دو جمله تشکیل می‌شود که یکی گشتاور حاصل از احتراق و دیگری



شکل ۵ مدار معادل RC برای شبیه‌سازی شارژر نخستین خازن موجود در اینورتر

جدول ۲ ضرایب مربوط به کنترلرهای استفاده شده در مجموعه موتور احتراقی-ژنراتور کنترلرهای مورد استفاده در مجموعه موتور احتراقی-ژنراتور

بهره	بهره	بهره	بهره	ضرایب بهره	
مشتق‌گیر	انتگرال‌گیر	تناسبی	کنترلر شماره ۱	کنترلر شماره ۲	ژنراتور
۱/۳	۰/۰۱	۳	کنترلر شماره ۱	کنترلر شماره ۲	ژنراتور
۲/۲	۵	۱۲	کنترلر شماره ۲	ژنراتور	
۰/۵	۷	۵	ژنراتور		

$S_{precharge}$  و  $S_{main}$  به ترتیب بیان‌گر کنتاکتورهای پیش‌شارژ و اصلی هستند.  $V_{in}$  و  $V_{Bat.}$  به ترتیب ولتاژ مجموعه باتری و ولتاژ ورودی به ژنراتور را نشان می‌دهند. در حالتی که  $S_{precharge}$  وصل و  $S_{main}$  قطع باشند، یک مدار RC خواهیم داشت که در آن ولتاژ و جریان برابر است با:

$$i(t) = \frac{V_{Bat.}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (۶)$$

$$V_{in}(t) = V_{Bat.} (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (۷)$$

پس از آن که عمل پیش‌شارژ تمام شد، کلید  $S_{main}$  وصل و کلید  $S_{precharge}$  قطع می‌شود و ولتاژ ورودی به ژنراتور برابر ولتاژ مجموعه باتری خواهد شد. اگر به دلیلی کنتاکتورهای اصلی قطع شوند، گشتاور ژنراتور و در نتیجه جریان آن صفر خواهد شد. پانل جلویی شبیه‌ساز طراحی شده برای سیستم تولید قدرت در شکل ۸ نشان داده شده است.

#### ۴- نتایج

برای صحت‌گذاری عملکرد شبیه‌ساز طراحی شده، یک تست روی موتور واقعی انجام شده است به این صورت که چند فرمان دور به کنترلر موتور اعمال شده است (از طریق واسط CAN موتور که ADM2 نام دارد (به شکل ۲ مراجعه کنید) و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است (دور خلاص موتور برابر ۵۵۰ دور بر دقیقه است). مقادیر دورهای درخواستی به ترتیب برابر ۹۵۰، ۱۲۵۰ و ۱۸۵۰ دور بر دقیقه می‌باشند. همان‌طور که دیده می‌شود، شبیه‌ساز طراحی شده رفتاری نزدیک به نتایج واقعی از خود نشان می‌دهد. در این تست حداکثر خطا برابر ۵ درصد است که در بیشترین تغییر دور (تغییر دور از ۱۲۵۰ به ۱۸۵۰ دور بر دقیقه) به وجود آمده است. برای حل معادلات از گام زمانی یک میلی‌ثانیه استفاده شده است. خطای موجود در شبیه‌سازی پلادرنگ در هر تکرار حداکثر برابر ۱/۰۰۱ میکروثانیه که در تحقیق حاضر قابل قبول است.

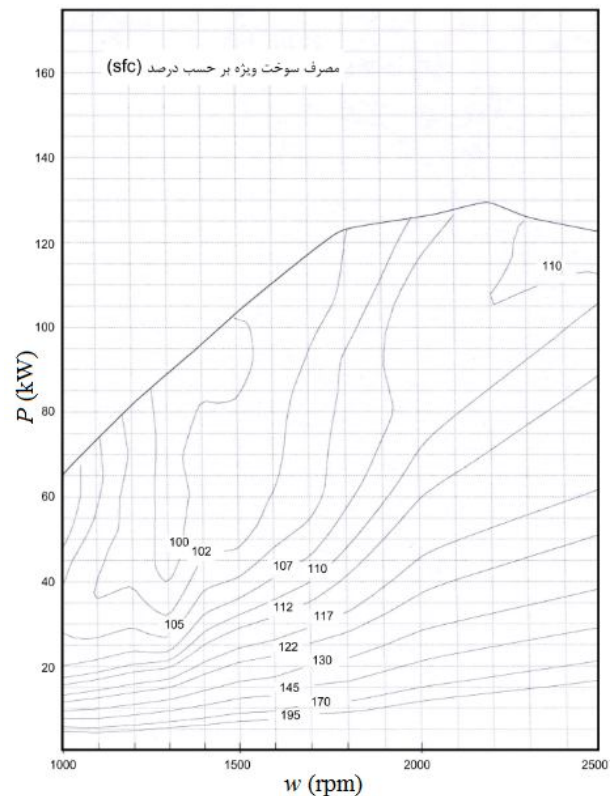
برای بررسی عملکرد مجموعه موتور احتراقی-ژنراتور، رفتار مجموعه به‌ازای ورودی‌های مختلف بررسی شده است. شکل‌های ۷، ۹، ۱۰ و ۱۱ نتایج تست فرآیند روشن شدن نرم مجموعه موتور احتراقی-ژنراتور را نشان می‌دهند.

$$P_1 = T_1 \omega_1, P_2 = v i, \eta = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow i = \frac{\eta T_1 \omega_1}{v} \quad \text{حالت ژنراتوری:}$$

$$P_1 = v i, P_2 = T_1 \omega_1, \eta = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow i = \frac{T_1 \omega_1}{\eta v} \quad \text{حالت موتوری:} \quad (۵)$$

که در معادله (۵)،  $\eta$  راندمان عملکردی ژنراتور است. لازم به یاد است که در شبیه‌سازی، جریان مصرفی با علامت مثبت و جریان تولیدی با علامت منفی لحاظ شده‌اند؛ بنابراین جریان در حالت ژنراتوری با علامت منفی و جریان در حالت موتوری با علامت مثبت نشان داده می‌شوند. برای محاسبه مصرف سوخت موتور دیزل از داده‌های شرکت سازنده استفاده شده است که در شبیه‌سازی به شکل یک جدول جستجو با ورودی‌های دور و توان و خروجی مصرف سوخت پیاده‌سازی شده است (شکل ۴، مصرف سوخت ۱۰۰ درصد معادل ۱۹۲ گرم بر کیلووات ساعت است).

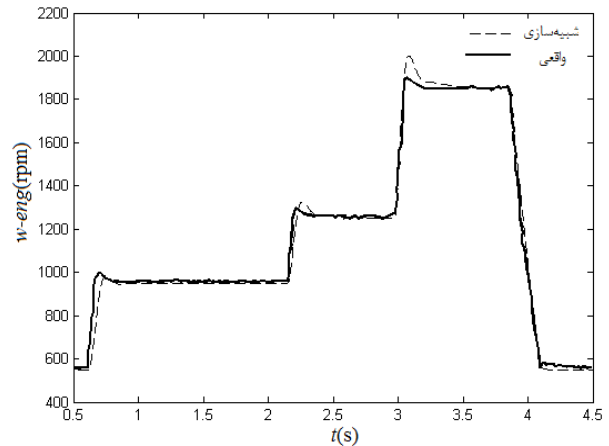
برای تأمین ولتاژ ورودی به ژنراتور از یک سیستم پیش‌شارژ استفاده می‌شود. مجموعه پیش‌شارژ در اتوبوس هیبرید متشکل از یک رله و یک مقاومت اهمی است و وظیفه شارژ اولیه خازن‌های اینورترها را بر عهده دارد. عملکرد این مجموعه به این شکل است که در ابتدا مسیر جریان از طریق مجموعه پیش‌شارژ بسته می‌شود. وجود مقاومت پیش‌شارژ مانع از کشیدن جریان بسیار زیاد توسط خازن‌ها از مجموعه باتری‌ها در لحظه نخستین شارژ می‌شود. پس از مدت زمان مشخصی این مجموعه از مسیر خارج شده و مسیر جریان از طریق کنتاکتورهای اصلی بسته می‌شود. برای شبیه‌سازی عمل پیش‌شارژ در شارژر خازن اینورتر از یک مدار معادل RC استفاده شده است. با ارسال فرمان پیش‌شارژ از واحد کنترل مرکزی، خازن موجود در اینورتر آغاز به شارژ شدن می‌کند و وقتی شارژ تمام شد، ولتاژ دو سر خازن برابر ولتاژ مجموعه باتری شده و به عنوان ولتاژ ورودی به ژنراتور اعمال می‌شود. شکل ۵ مدار معادل مربوطه را نشان می‌دهد.



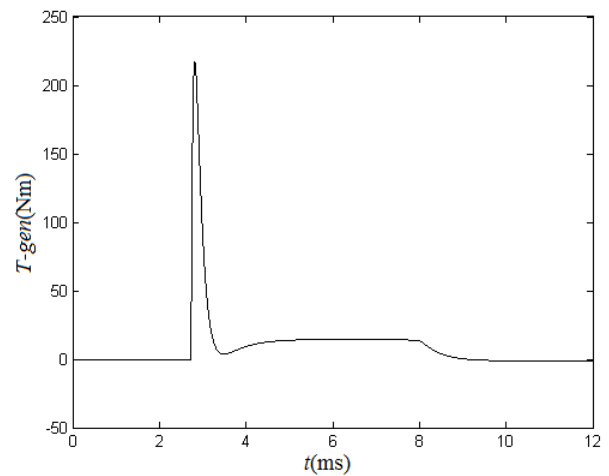
شکل ۴ منحنی مصرف سوخت موتور دیزل

همان‌طور که انتظار می‌رود، زمانی که موتور احتراقی خاموش است و سوخت پاشیده نمی‌شود، موتور احتراق داخلی گشتاور منفی اعمال می‌کند و با روشن شدن موتور و شروع پاشش سوخت، این گشتاور منفی که پیش‌تر راجع به آن توضیح داده شد حذف می‌شود. علاوه بر آن، مقادیر پایای دور و گشتاور موتور احتراقی و ژنراتور نسبتی برابر ضریب دنده گیربکس دارند (جدول ۱).

شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ عملکرد کنترلر طراحی شده را نشان می‌دهند. در حالتی که موتور احتراقی در حالت کنترلی سرعت- مینا قرار دارد، با اعمال مبنای گشتاور ۱۰۰- و سپس ۲۰۰ نیوتون متر به ژنراتور، دور موتور احتراقی و ژنراتور به مقدار فرمان داده شده باز می‌گردد. با توجه به این‌که در ابتدا برای گشتاورها منفی است، دور کاهش می‌یابد و برای جبران گشتاور منفی حاصل از ژنراتور، گشتاور موتور احتراقی به نحوی افزایش می‌یابد که دور موتور احتراقی به مقدار فرمان داده شده بازگردد. همان‌طور که دیده می‌شود، نسبت گشتاور پایای موتور احتراقی به گشتاور ژنراتور برابر ضریب دنده گیربکس است. تست سوم روی موتور دیزل تعریف شده است. با فرض این‌که هیچ باری روی موتور دیزل نیست، فرمان روشن شدن عادی موتور دیزل داده می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رود، موتور دیزل به دور حالت خلاص خود می‌رسد. با اعمال مبنای گشتاور ۱۰۰ نیوتون متر به موتور دیزل، با توجه به این‌که هیچ باری روی موتور نیست، دور موتور شروع به زیاد شدن می‌کند. پس از مدت زمانی، با کم کردن مبنای گشتاور تا صفر دور موتور به تدریج کاهش یافته و زمانی که گشتاور درخواستی برابر صفر شود (که معادل برداشتن پا از روی پدال گاز در خودروهای معمولی است)، پاشش سوخت قطع شده و حالت ترمزی در موتور بوجود می‌آید تا در نهایت دور موتور به دور خلاص خود برسد. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نتایج این تست را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج نشان داده شده و سایر نتایج به‌دست آمده، شبیه‌ساز طراحی شده قادر است رفتارهایی نزدیک به واقعیت را در پاسخ به ورودی‌های مختلف از خود نشان دهد. به عبارت دیگر، با اعمال فرامین ارسالی از واحد کنترل خودروی هیبرید که برای کنترل عملکرد مجموعه موتور احتراقی- ژنراتور ارسال می‌شود، می‌توان با مشاهده رفتار حاصل از این فرامین در شبیه‌ساز، عملکرد واحد کنترل را بررسی کرد.

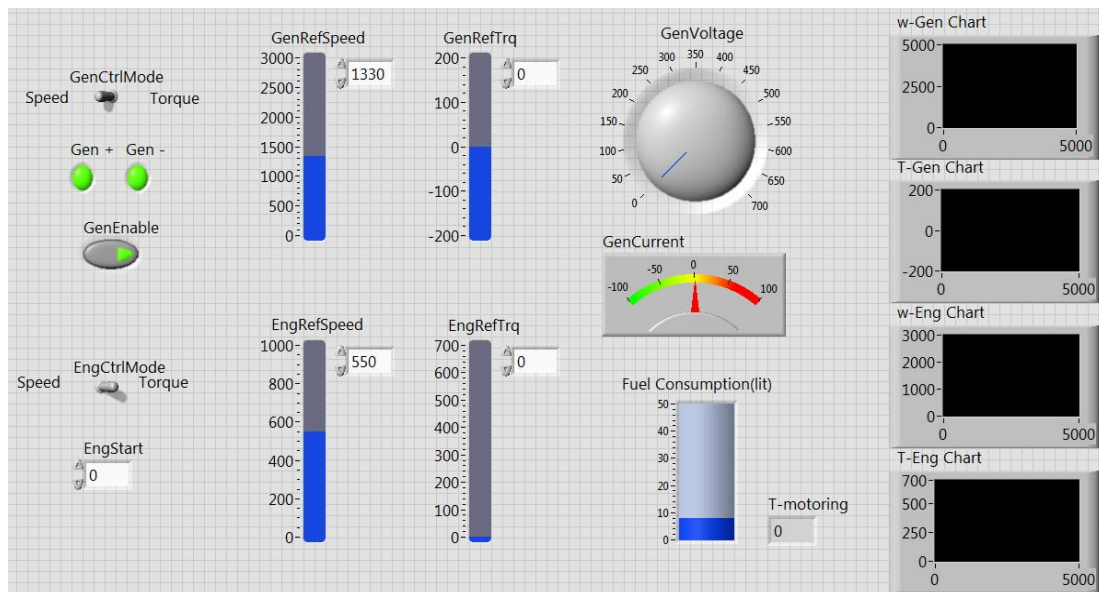


شکل ۶ تغییر دور موتور دیزل با اعمال چند فرمان دور



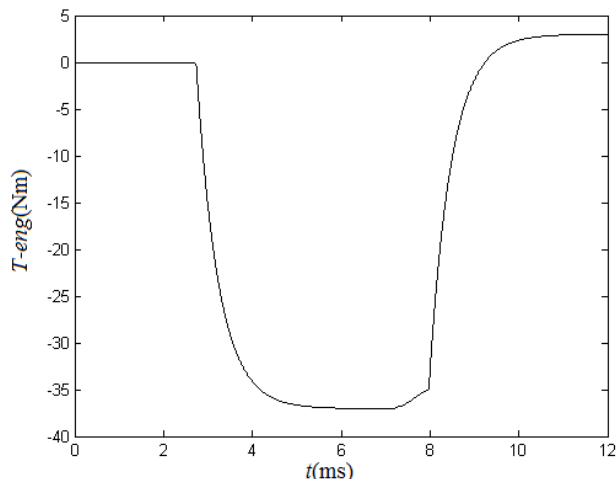
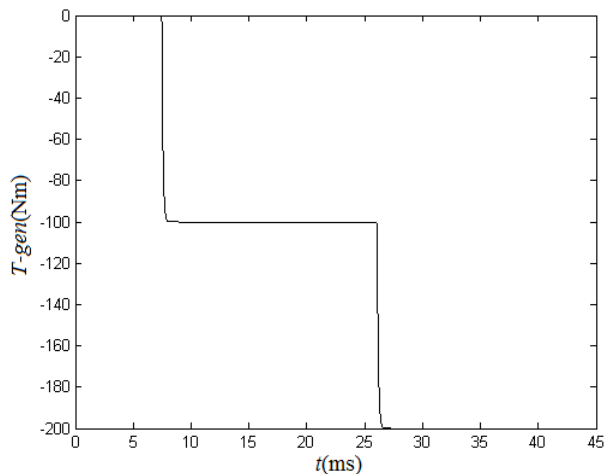
شکل ۷ تغییرات گشتاور ژنراتور بر حسب زمان در تست روشن شدن نرم مجموعه موتور-ژنراتور

در این فرآیند نخست ژنراتور در حالت موتوری قرار گرفته و با دریافت مبنای سرعت، موتور احتراقی را به دور حالت خلاص می‌رساند و پس از آن، فرمان روشن شدن موتور احتراقی صادر می‌شود.



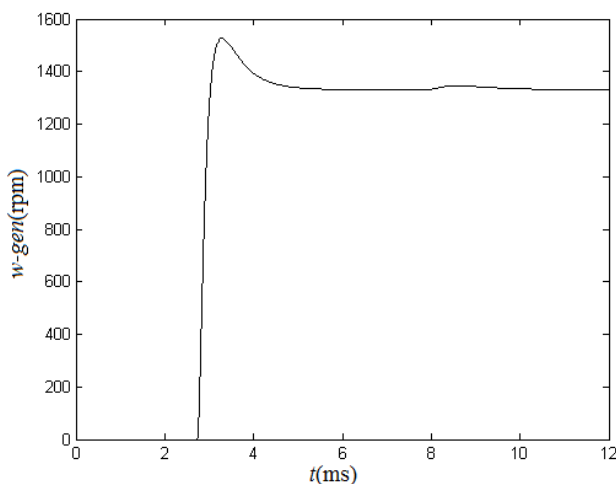
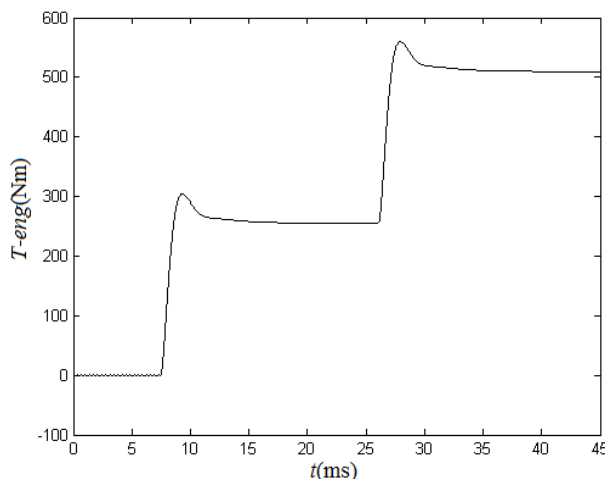
شکل ۸ پانل جلویی شبیه‌ساز مجموعه تولید توان

در حلقه به عنوان یک راه‌کار مؤثر در توسعه و صحت‌گذاری عملکرد این قسمت از خودرو در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. نخستین گام در طراحی یک بستر تست سخت‌افزار در حلقه، طراحی یک شبیه‌ساز از قسمت‌هایی از سیستم است که باید در ارتباط با سخت‌افزار موردنظر قرار بگیرد.



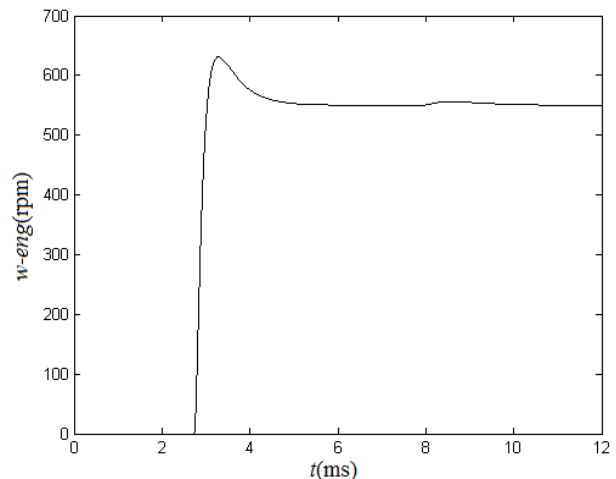
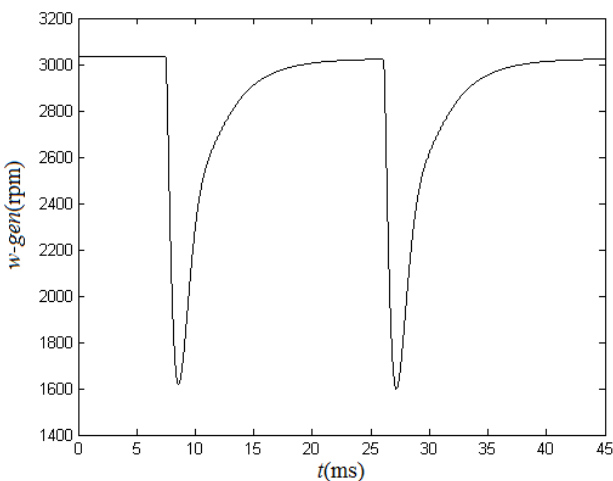
شکل ۹ تغییرات گشتاور موتور احتراقی بر حسب زمان در تست روشن شدن نرم مجموعه موتور- ژنراتور

شکل ۱۲ تغییرات گشتاور ژنراتور بر حسب زمان در تست عملکرد کنترلر PID طراحی شده



شکل ۱۰ تغییرات دور ژنراتور بر حسب زمان در تست روشن شدن نرم مجموعه موتور- ژنراتور

شکل ۱۳ تغییرات گشتاور موتور احتراقی بر حسب زمان در تست عملکرد کنترلر PID طراحی شده



شکل ۱۱ تغییرات دور موتور احتراقی بر حسب زمان در تست روشن شدن نرم مجموعه موتور- ژنراتور

شکل ۱۴ تغییرات دور ژنراتور بر حسب زمان در تست عملکرد کنترلر PID طراحی شده

در خودروهای هیبرید، کنترل و هماهنگی قسمت‌های مختلف خودرو به‌وسیله واحد کنترل مرکزی صورت می‌گیرد. با توجه به پیچیدگی‌هایی که در واحد کنترل مرکزی خودروی هیبرید وجود دارد، استفاده از شبیه‌سازی سخت‌افزار

نیاز به سخت‌افزار خارجی انجام شده است و شبیه‌ساز طراحی شده بر رایانه‌های تحت ویندوز نیز قابل اجرا است. از این‌رو، هزینه و زمان انجام تست سخت‌افزار در حلقه کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که با اعمال ورودی‌های متعدد، این شبیه‌ساز رفتار قابل قبولی را در مقایسه با نتایج حاصل از تست‌های تجربی از خود نشان می‌دهد و می‌تواند در توسعه الگوریتم‌های کنترلی موجود در واحد کنترل مرکزی خودروهای هیبرید سری با عملکرد مشابه از راه بستر تست‌های نرم‌افزار در حلقه و سخت‌افزار در حلقه قابل استفاده قرار گیرد.

## ۶- تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله، از مجموعه پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران که بستر مناسبی جهت انجام این پژوهش فراهم آورده‌اند کمال تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## ۷- علائم و نشانه‌ها

### فهرست علائم

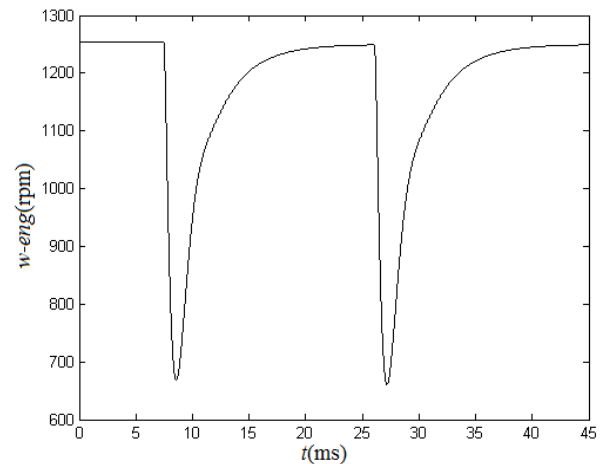
جریان ژنراتور	$i$
توان‌های ورودی و خروجی ژنراتور	$P_1, P_2$
دور بر دقیقه	rpm
گشتاور	$T$
ولتاژ ورودی ژنراتور	$v$
سرعت زاویه‌ای	$\omega$

### زیر نویس‌ها

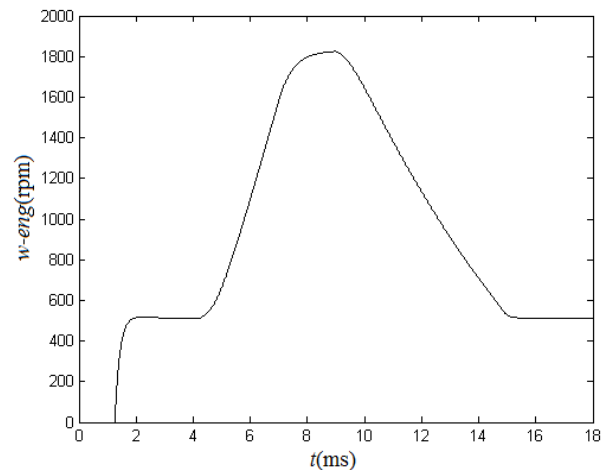
باتری	Bat.
موتور احتراقی	eng
معادل	eq
ژنراتور	gen
اصلی	main
پیش‌شارژ	precharge

## ۸- مراجع

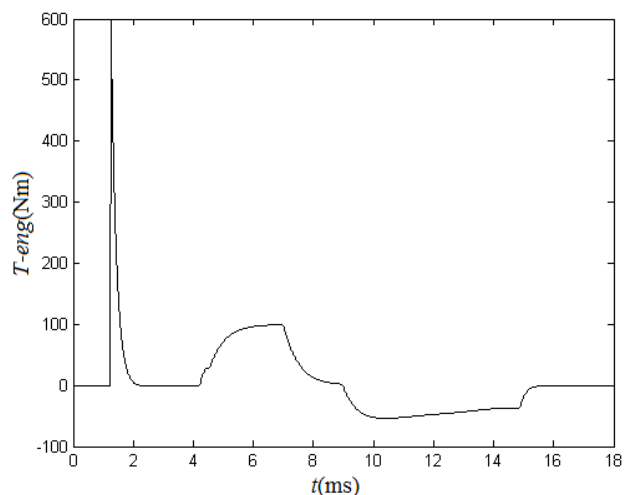
- [1] H. He, R. Xiong, K. Zhao, Z. Liu, Energy management strategy research on a hybrid power system by hardware-in-loop experiments, *Applied Energy*, pp. 1-7, 2013.
- [2] H. K. Fathy, Z. S. Filipi, J. Hagen, J. L. Stein, Review of hardware-in-the-loop simulation and its prospects in the automotive area, in *Proceeding of International Society for Optics and Photonics*, pp. 62280E-62280E-20.
- [3] S. Nabi, M. Balike, J. Allen, K. Rzemien, An overview of hardware-in-the-loop testing systems at Visteon, *SAE paper 2004-01-1240*, Vol. 5, 2004.
- [4] D. Ramaswamy, R. McGee, S. Sivashankar, A. Deshpande, J. Allen, K. Rzemien, W. Stuart, A case study in hardware-in-the-loop testing: Development of an ECU for a hybrid electric vehicle, *SAE SP*, pp. 33-42, 2004.
- [5] L. Wang, Y. Zhang, C. Yin, H. Zhang, C. Wang, Hardware-in-the-loop simulation for the design and verification of the control system of a series-parallel hybrid electric city-bus, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 25, pp. 148-162, 2012.
- [6] L. U. Gökdere, K. Benlyazid, R. A. Dougal, E. Santi, C. W. Brice, A virtual prototype for a hybrid electric vehicle, *Mechatronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 575-593, 2002.
- [7] E. Moreira, R. Pantoni, D. Brandão, Equipment Based on the Hardware in the Loop (HIL) Concept to Test Automation Equipment Using Plant Simulation, *Practical Application and Solutions Using LabVIEW™ Software, Folea Silviu (Ed.)*, pp. 133-152, 2011.
- [8] H. Zhong, G. Ao, J. Qiang, L. Yang, B. Zhuo, The development of a real-time hardware-in-the-loop test bench for hybrid electric vehicles based on multi-thread technology, in *Proceeding of, IEEE*, pp. 470-475.



شکل ۱۵ تغییرات دور موتور احتراقی بر حسب زمان در تست عملکرد کنترلر PID طراحی شده



شکل ۱۶ تغییرات دور موتور احتراقی بر حسب زمان در تست مدل موتور احتراقی



شکل ۱۷ تغییرات گشتاور موتور احتراقی بر حسب زمان در تست مدل موتور احتراقی

## ۵- جمع بندی

در این راستا، یک شبیه‌ساز موتور احتراقی-ژنراتور برای یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری طراحی شده است که رفتار دینامیکی قسمت‌های مختلف این مجموعه اعم از موتور دیزل، ژنراتور و اینورتر آن را در پاسخ به ورودی‌های متعدد به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. در این تحقیق، شبیه‌سازی بلادرنگ بدون