

طراحی پایدار ساز فازی در سیستم‌های قدرت چند ماشینه با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی

اویس عابدی نیا^{۱*} و نیما امجدی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: پایدار ساز سیستم قدرت، کنترل کننده فازی، قوانین فازی، سیستم چند ماشینه، الگوریتم جستجوی هارمونی.</p>	<p>در این مقاله طراحی و بهینه‌سازی قوانین کنترل کننده فازی در سیستم قدرت چند ماشینه با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی ارائه شده است. استفاده از کنترل کننده فازی PID یکی از روش‌های مناسب برای پایداری در سیستم‌های غیرخطی می‌باشد. رفتار کنترل کننده‌های فازی به اطلاعات طراحی شامل انتخاب توابع عضویت و قوانین کنترلی بستگی دارند. در روش‌های طراحی سنتی، اطلاعات طراحی مبتنی بر تجربه افراد خبره است که از طریق آزمون سعی و خطا تعیین می‌گردد. بنابراین طراحی یک کنترل کننده مناسب زمان‌بر می‌باشد. بنابراین انتخاب بهینه قوانین فازی و یا شکل توابع عضویت مسأله بسیار مهمی می‌باشد. و این مسأله بدون نیاز به تجربیات افراد خبره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی الگوریتم پیشنهادی هارمونی نیز در بررسی نتیجه عملکرد اجزا به دنبال هماهنگی مطلوب می‌باشد که در حل مسائل بهینه‌سازی به دنبال یافتن بهترین مسیر است تا بوسیله آن هزینه توابع محاسباتی را کاهش دهد. لذا کنترل کننده پیشنهادی در نقاط کار مختلف بر روی سیستم قدرت استاندارد سه ماشینه IEEE و ده ماشینه New-England مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج تحلیل مقادیر ویژه سیستم و شبیه‌سازی با دیگر روش‌ها مقایسه گردیده است.</p>

۱- مقدمه

کوچک با استفاده از تنظیم کننده‌های پیوسته و سریع تشخیص داده شد. در اوایل دهه ۱۹۶۰ با اعمال سیگنال‌های کمکی پایدارساز (علاوه بر سیگنال خطای ولتاژ) به منظور کنترل ولتاژ تحریک و میرا کردن نوسان‌های سیستم نقش محوری‌تر و مهم‌تری به سیستم‌های تحریک داده شد [۱-۲]. سیستم‌های تحریک شامل قسمت‌های مختلف می‌باشد. این بلوک معمولاً شامل مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت روتور، توان شتاب دهنده روتور و یا فرکانس ولتاژ می‌باشد. در یک سیستم واقعی که روش‌های بسیاری برای بدست آوردن جواب وجود

با پیشرفت صنعت برق، تغییراتی در سیستم‌های آن به وجود آمد. در ابتدا سیستم‌های تحریک به صورت دستی کنترل می‌شدند. تا قبل از سال ۱۹۲۰ سیستم تحریک یا کنترل ولتاژ به صورت خودکار درآمد ولی عملکرد آنها بسیار کند بود و عملاً نقش یک کاربر ماهر را بازی می‌کرد. در اوایل سال ۱۹۲۰ امکان بالقوه بهبود پایداری گذرا و اغتشاش‌های سیگنال

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: oveis.abedinia@gmail.com

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

دارد رسیدن به بهینه‌ترین جواب راه مشکلی است. در سال‌های اخیر با توجه به مشکلات موجود در روش‌های کلاسیک، از روش‌های هوشمند برای بدست آوردن جواب بهینه استفاده شده است [۳-۴].

سیستم تحریک نقش بسیار مؤثری در میرا کردن نوسانات فرکانس، توان اکتیو و راکتیو ایفا می‌کند. این نقش یعنی تقویت پایداری دینامیکی، با استفاده از حلقه کنترل پایدارساز سیستم قدرت اهمیت زیادی دارد. هم‌چنین AVR^۱ در تقویت پایداری گذرا یعنی حفظ پایداری پس از اغتشاشات شدید می‌تواند نقش بسیار مؤثری بازی نماید. البته تقویت پایداری دینامیکی و گذرا در صورتی مؤثر است که سرعت پاسخ سیستم AVR مناسب باشد. سیستم‌های بسیار کند AVR اولیه نمی‌توانند نقش مؤثری در این زمینه ایفا کنند.

هدف اصلی سیستم‌های کنترلی در یک سیستم قدرت تأمین توان حقیقی و واکنشی لازم مصرف‌کننده در ولتاژ و فرکانس دلخواه است. با اصلاح این فرکانس در حلقه کنترل فرکانس، می‌توان علاوه بر کنترل فرکانس شبکه، توان حقیقی را نیز کنترل کرد. با اصلاح ولتاژ دلخواه در حلقه کنترل ولتاژ نیز می‌توان توان واکنشی را نیز کنترل کرد [۵].

پس حلقه‌های کنترلی گاورنر و AVR نقشی اساسی در کنترل سیستم‌های قدرت دارند. ولی از ابتدای امر مشخص گردید که آنها برای از بین بردن نوسانات حالت گذرا توانایی محدودی دارند. به همین دلیل به یک حلقه کنترل کننده دیگر جهت کمک به این دو حلقه فکر شد. بعضی یک سیستم کنترلی چند متغیره، که تداخل‌ها را نیز منظور و از روش‌های پیشرفته کنترلی استفاده می‌کند، را برای

جایگزینی این دو حلقه پیشنهاد کردند. ولی به دلیل استفاده دیرینه از این دو حلقه کنترلی در نیروگاه‌ها و امتحان شدن و قابل اعتماد بودنشان از این ایده استقبالی نشد. لذا کنترل‌کننده تکمیلی پیشنهاد شد. در این حالت سیستم توربوژنراتور همراه با حلقه‌های کنترلی فرکانس و ولتاژ، با هم به صورت یک سیستم کنترلی تعریف و سپس یک حلقه کنترلی اضافی روی آن سوار می‌شود. این حلقه کنترلی اضافی را اصطلاحاً پایدارساز سیستم قدرت (PSS^۲) نامیده‌اند.

برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت (PSS) پیشنهادهای بسیار متنوع و متفاوتی ارائه شده و این موضوع قدرتی - کنترلی، برای بسیاری از محققین جالب توجه بوده و مقالات بسیار متنوعی در این باره منتشر شده است و هنوز نیز در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی روش‌های جدیدی پیشنهاد می‌شود [۵].

ابتدایی‌ترین روش برای طراحی PSS، طراحی سنتی می‌باشد. طراحی سنتی بر اساس جبران‌کننده‌های پیش‌فاز می‌باشد. این کنترل‌کننده‌ها برای یک نقطه نامی طراحی و تنظیم می‌شوند. سیستم کنترل شده در چنین PSS‌هایی از استحکام و عملکرد مناسبی برخوردار نمی‌باشد. و تنها در یک محدوده کوچک از تغییرات نقطه کار پایداری خود را حفظ می‌کند [۶-۷].

روش دیگر، روش تئوری کنترل بهینه می‌باشد. تئوری کنترل بهینه بر اساس مدل فضای حالت نیز در طراحی PSS مدرن استفاده شده و کارایی آنرا بهبود بخشیده است، اما استحکام و انعطاف‌پذیری سیستم هنوز به‌عنوان یک مسأله مهم باقی مانده است. در این PSS چنانچه تغییرات نقطه کار نسبت به نقطه نامی بزرگ باشد، کارایی سیستم از محدوده مطلوب خارج می‌گردد [۸].

² Power System Stabilizer

¹ Automatic Voltage Regulator

تابع هدف مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج حاصله نشان از کارایی بهتر کنترل‌کننده پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر می‌باشد.

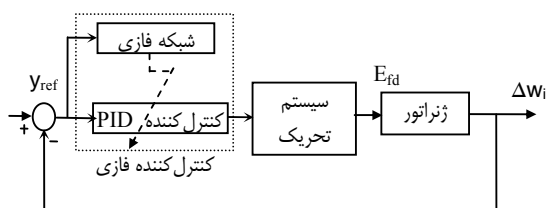
۲- کنترل‌کننده PID فازی

اصولاً سیستم فازی، سیستم‌های مبتنی بر دانش یا قواعد می‌باشند. قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر آنگاه فازی تشکیل شده است. یک قاعده اگر آنگاه فازی یک عبارت اگر آنگاه بوده که بعضی کلمات آن به

وسیله توابع تعلق پیوسته مشخص می‌شوند [۹]. عموماً به‌کارگیری کنترل‌کننده‌های فازی در دو قالب اصلی طبقه‌بندی می‌گردد:

- بهره‌های کنترل‌کننده PID سنتی به‌صورت on-line و بر اساس دانش مبتنی بر موتور استنتاج فازی در شرایط کاری مختلف مشخص شده سپس سیگنال کنترلی محاسبه شده و به سیستم اعمال می‌شود.
- سیگنال کنترلی به‌صورت مستقیم و بر اساس دانش مبتنی بر موتور استنتاج فازی با توجه به شرایط کاری مختلف محاسبه شده و به سیستم اعمال می‌شود.

شکل ۱ نمایش بلوکی کنترل‌کننده فازی برای حل مسأله پایداری سیستم قدرت در سیستم را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایش بلوکی کنترل‌کننده PID فازی

عملکرد یک کنترل‌کننده فازی شامل پنج مرحله است. به‌طوری‌که بعد از پردازش و استنتاج متغیرهای ورودی، خروجی سیستم فازی تعیین شده و به سیستم اعمال

روش دیگر برای طراحی PSS کنترل تطبیقی می‌باشد، که اخیراً توسعه زیادی داشته است. این روش با وجود اینکه می‌تواند مسأله حفظ کارایی مطلوب سیستم را با وجود تغییر پارامترها حل کند، ولی نتیجه طراحی یک سیستم بسیار پیچیده در مقایسه با کنترل‌کننده سنتی خواهد بود. هم‌چنین کنترل‌کننده تطبیقی مشکلات خاص خود از قبیل همگرایی و دینامیک مدل نشده را نیز به‌همراه دارد [۹].

در سال‌های اخیر، روش‌های هوشمند بسیاری مورد استفاده طراحان کنترل‌کننده قرار گرفته است. که می‌توان به الگوریتم ژنتیک [۱۰-۱۱]، جستجوی ممنوع [۱۲]، الگوریتم مورچگان [۱۳]، شبکه عصبی [۱۴]، جستجوی هارمونی [۱۵] و... اشاره نمود.

الگوریتم جستجوی هارمونی، الگوریتمی است که با الهام از نحوه شکل‌گیری و چگونگی عملکرد یک ارکستر موسیقایی به دنبال راه حل بهینه و یا به عبارت ساده‌تر، بهترین هماهنگی بین اجزا دخیل در راهبری یک فرایند است همان‌طور که نوازنده‌ها در یک ارکستر قطعات موسیقایی را می‌نوازند، تا از بین آنها بهترین ترکیب، محصول نهایی را پدید آورد [۱۵].

روش هوشمند دیگری که در دهه‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از کنترل‌کننده‌های فازی می‌باشد. در این ساختار، بلوک کنترل‌کننده فازی به‌جای بلوک پایداری‌ساز سیستم (lead-lag) قرار می‌گیرد. به عبارتی بلوک فازی وظیفه میرا کردن نوسانات وارده بر سیستم را به‌عهده می‌گیرد [۱۶-۱۷].

در این مقاله با استفاده از نقاط قوت الگوریتم هارمونی و کنترل‌کننده فازی دو سیستم قدرت چند ماشینه در نقاط کار مختلف مورد تست قرار می‌گیرد. هم‌چنین، دو مقادیر ویژه سیستم بر اساس

$$u_i = K_{pi} \Delta \omega_i(t) + K_{di} \int_0^t \Delta \omega_i(t) dt + K_{di} \Delta \dot{\omega}_i(t) \quad (۴)$$

اینک می‌توان قواعد اگر - آنگاه فازی را استنتاج کرد. فرض کنید که قواعد اگر - آنگاه فازی به فرم زیر باشند. اگر $e(t)$ متعلق به A^L و $e'(t)$ متعلق به B^L باشد آنگاه \dot{K}_p متعلق به C^L و \dot{K}_d متعلق به D^L و α متعلق به E^L است که A^L, B^L, C^L, D^L, E^L مجموعه‌های فازی بوده و M, \dots, L می‌باشد.

با استفاده از این نوع ایده، ما قادر خواهیم بود که سه مجموعه از قواعد را برای \dot{K}_p و \dot{K}_d و α تعیین نماییم به طوری که هر مجموعه حاوی ۴۹ قاعده باشد. ۴۹ قانون موجود در هر مجموعه با استفاده از موتور استنتاج ضرب، فازی‌ساز منفرد و غیر فازی‌ساز میان بهره مراکز ترکیب می‌گردد. بنابراین پارامترهای \dot{K}_p و \dot{K}_d و α مطابق روابط (۵) و (۶) و (۷) حاصل می‌گردند:

$$K'_p(t) = \frac{\sum_{l=1}^{49} y_p^{-l} \mu'_A(e(t)) \mu'_B(e'(t))}{\sum_{l=1}^{49} \mu'_A(e(t)) \mu'_B(e'(t))} \quad (۵)$$

$$K'_d(t) = \frac{\sum_{l=1}^{49} y_d^{-l} \mu'_A(e(t)) \mu'_B(e'(t))}{\sum_{l=1}^{49} \mu'_A(e(t)) \mu'_B(e'(t))} \quad (۶)$$

$$\alpha(t) = \frac{\sum_{l=1}^{49} y_\alpha^{-l} \mu'_A(e(t)) \mu'_B(e'(t))}{\sum_{l=1}^{49} \mu'_A(e(t)) \mu'_B(e'(t))} \quad (۷)$$

که y_p^{-l} و y_d^{-l} و y_α^{-l} مراکز متناظر با مجموعه‌های فازی در زبانه‌های فازی می‌باشند.

با توجه به مراحل طراحی که اشاره شد، این نوع کنترل-کننده‌ها نیاز به اطلاعات سه‌بعدی دارد و در نتیجه سه جدول مشتمل بر قوانین فازی را باید به‌دست آورد [۲۰]. استخراج قوانین سه‌بعدی با توجه به دانش بشری و تجربیات افراد خبره مشکل می‌باشد. همچنین درک و استنباط اطلاعات سه‌بعدی کار پیچیده‌ای بوده، بنابراین طراحی چنین کنترل‌کننده‌ای مشکل می‌باشد. لذا در

می‌شود [۱۸]. این پنج مرحله را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

- ۱- فازی سازی متغیرهای ورودی
- ۲- اعمال عملگرهای فازی
- ۳- استنتاج فازی
- ۴- جمع کردن نتایج از میان نتایج حاصل از هر جزء
- ۵- غیرفازی سازی نتایج

در سیستم سنتی کنترل‌کننده متعارف یک کنترل‌کننده PID می‌باشد که سیستم فازی بهره‌های PID را به صورت بی‌درنگ تعیین می‌نماید. سیستم فازی از یک مجموعه قواعد اگر- آنگاه فازی بنا نهاده شده است که چگونگی انتخاب بهره‌های PID را تحت شرایط عملکرد مشخص تشریح می‌کند.

محدوده‌های $[K_{pmin}, K_{pmax}] \in K_p$ و $[K_{dmin}, K_{dmax}] \in K_d$ را برای بهره تناسبی و بهره مشتق تعیین می‌شوند. جهت ساده‌سازی K_p و K_d را در محدوده بین صفر و یک با استفاده از تبدیل خط زیر نرمالیزه می‌شوند:

$$K'_p = \frac{K_p - K_{pmin}}{K_{pmax} - K_{pmin}} \quad (۱)$$

$$K'_d = \frac{K_d - K_{dmin}}{K_{dmax} - K_{dmin}} \quad (۲)$$

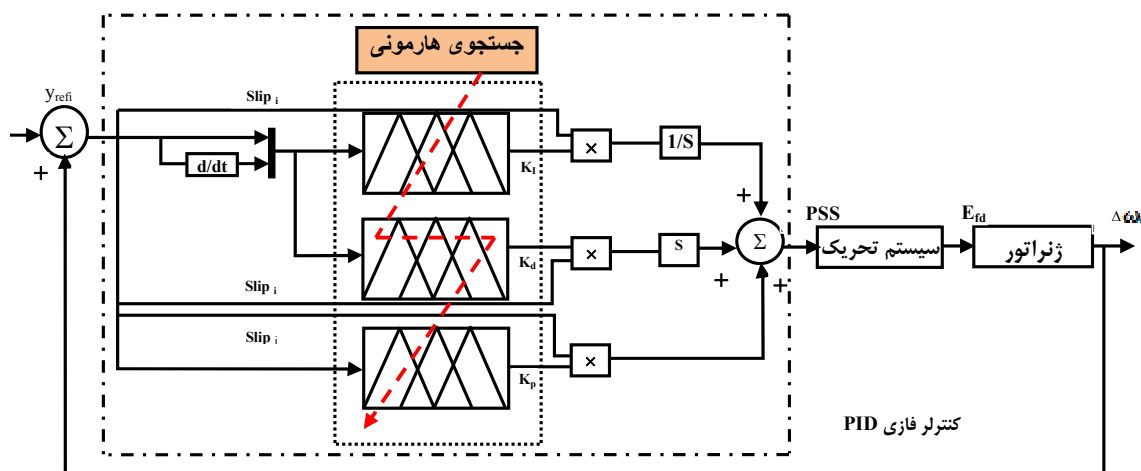
فرض می‌شود که ثابت زمانی انتگرال نسبت به ثابت زمانی مشتق و به‌وسیله رابطه $T_i = \alpha / T_d$ تعیین گردد، که با توجه به آن رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

$$K_i = K_p (\alpha T_d) = K_p^2 / (\alpha K_d) \quad (۳)$$

و لذا \dot{K}_p و \dot{K}_d و α پارامترهایی هستند که به‌وسیله سیستم فازی تعیین می‌گردند. اگر بتوان این پارامترها را تعیین کرد، در آن صورت بهره‌های PID می‌توانند از رابطه زیر به‌دست آیند. به‌طوری که سیستم فازی تعیین‌کننده پارامترها از ۳ سیستم فازی ۲ ورودی و یک خروجی تشکیل شده باشد [۱۹].

کننده پیشنهادی به صورت شکل ۲ خواهد بود.

ادامه از الگوریتم جستجوی هارمونی بهره خواهیم برد. و اعمال روش هوشمند الگوریتم پیشنهادی بر روی کنترل

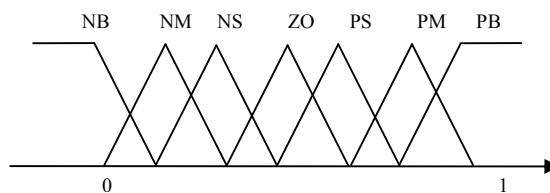


شکل ۲- ساختار کنترل کننده پیشنهادی هارمونی-فازی

موسیقیایی را می‌نوازند تا از بین آنها بهترین ترکیب، محصول نهایی را پدید آورد. این الگوریتم در بررسی نتیجه عملکرد اجزا به دنبال هماهنگی مطلوب می‌باشد به عبارت دیگر الگوریتم مذکور دارای قابلیت بهینه‌سازی مساله با در نظر گرفتن شرایط حاکم در مساله می‌باشد. که در حل مسائل بهینه‌سازی به دنبال یافتن بهترین مسیر است تا بوسیله آن هزینه توابع^۱ محاسباتی را کاهش دهد [۲۱-۲۲]. مراحل روش جستجوی هارمونی به ترتیب عبارتند از:

- ۱- تعیین مسئله و پارامترهای الگوریتم
 - ۲- تعیین اولیه حافظه هارمونی
 - ۳- تولید یک هارمونی جدید
 - ۴- به روز نمودن حافظه هارمونی
 - ۵- بررسی ناحیه توقف الگوریتم
- در مرحله اول، مسئله بهینه‌سازی به صورت رابطه زیر تعیین می‌گردد.

شکل ۳ تابع عضویت را برای بهره‌های K_{di} , K_{pi} , K_{ii} نشان می‌دهد. تابع عضویت جهت تنظیم پارامترها، شامل هفت متغیر زبانی است که هر یک را می‌توان به مجموعه $v = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ نسبت داد.



شکل ۳: تابع عضویت برای K_{ii} , K_{pi} , K_{di}

۳- الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA^{*}) که نوعی از الگوریتم‌های فرا شهودی می‌باشد، الگوریتمی است که با الهام از نحوه شکل‌گیری و چگونگی عملکرد یک ارکستر موسیقی به دنبال راه حل بهینه و یا به عبارت ساده‌تر، بهترین هماهنگی بین اجزا دخیل در راهبری یک فرایند است. همان طور که نوازنده‌ها در یک ارکستر قطعات

[†] Cost function

^{*} Harmony Search Algorithm

در این مرحله یک بردار جدید $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$ بر مبنای سه قانون که به ترتیب عبارتند از ملاحظات حافظه، تنظیم صدا دهی، انتخاب تصادفی، تولید می‌شود که به این بردار بداهه‌نوازی نیز می‌گویند. مقدار اولین متغییر تصمیم‌گیری x_1^1 برای بردار جدید از هر مقداری که در محدوده HM وجود دارد، انتخاب می‌گردد. مقادیر دیگر متغییرها نیز به همین صورت انتخاب می‌گردند. HMCR، نرخ انتخاب یک مقدار از مقادیر محاسبه شده قبلی که در HM ذخیره شده است می‌باشد و (1-HMCR) نرخ گزینش تصادفی یک مقدار از محدوده ممکن مقادیر می‌باشد [۴۱].

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x_i^1 \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} & (HMCR) \\ x_i^1 \in X_i(1-HMCR) & \end{cases} \quad (10)$$

الگوریتم هارمونی مقدار متغییر تصمیم‌گیری را از کل محدوده مقادیر ممکن انتخاب می‌کند. که جواب‌های بدست آمده از ملاحظات حافظه برای تعیین این که تنظیم صدادهی مناسب‌تر است یا نه، امتحان می‌شوند. این عمل با استفاده از پارامتر PAR که نرخ تنظیم صدادهی است، انجام می‌گیرد. پارامتر PAR بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} Yes, Pr(PAR) \\ No, Pr(1-PAR) \end{cases} \quad (11)$$

اگر تصمیم برای تنظیم صدادهی Yes باشد x_i^1 بصورت زیر جایگزین می‌شود.

$$x'_i \leftarrow x_i^1 \pm rand() \times bw \quad (12)$$

که در رابطه بالا bw یک پهنای باند قابل شنیدن و $rand()$ شماره تصادفی بین ۰ و ۱ می‌باشد. در مرحله سوم ملاحظات HM تنظیم صدادهی یا گزینش انتخابی بر روی هر متغیر بردار هارمونی جدید اعمال می‌گردد.

به‌روز رسانی حافظه هارمونی

اگر بردار هارمونی جدید $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$ از بدترین بردار هارمونی در HM بر مبنای تابع هدف انتخابی بهتر

$$Minimize : \{f(x), x \in X\}$$

st

$$g(x) \geq 0$$

$$h(x) = 0$$

(۸)

به گونه‌ای که $f(x)$ تابع هدف، $h(x)$ تابع قیود مساوی و $g(x)$ تابع قیود غیرتساوی می‌باشد. x دسته‌ای از متغییر تصمیم‌گیری X و X_i مجموعه محدوده مقادیرهای ممکن هر متغییر تصمیم‌گیری می‌باشد و x_i بین $x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}$ می‌باشد که x_{iL} و x_{iU} حدود بالایی و پایینی برای هر متغییر تصمیم‌گیری است. پارامترهای HSA نیز در این مرحله اول مشخص می‌شوند که شامل اندازه حافظه هارمونی $(HMS)^*$ ، نرخ ملاحظه حافظه هارمونی $(HMCR)^\dagger$ ، نرخ تنظیم صدادهی $(PAR)^\ddagger$ ، تعداد بداهه‌سازی (NI) یا همان ناحیه توقف الگوریتم می‌باشند. حافظه هارمونی (HM) جایی است که تمام بردارهای جواب در آن ذخیره می‌شوند HMCR و PAR نیز پارامترهایی هستند که در مرحله سوم برای بهبود بردار جواب به کار می‌روند [۱۵].

تعیین اولیه حافظه هارمونی

در این مرحله ماتریس HM با تعداد بسیار زیادی بردار جواب به صورت تصادفی تولید شده و با توجه به HMS پر می‌گردد [۲۳]

(۹)

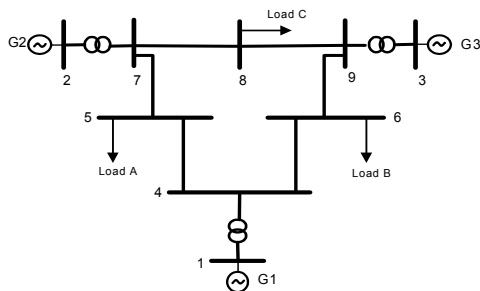
$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix}$$

تولید هارمونی جدید بر اساس بداهه نوازی

* Harmony Memory Size (HMS)

† Harmony Memory Considering Rate (HMCR)

‡ Pitch Adjustment Rate (PAR)



شکل ۴- دیاگرام تک خطی سیستم سه ماشینه

با توجه به طبیعت روش‌های مبتنی بر طبیعت، الگوریتم هارمونی چندین بار بر روی سیستم پیشنهادی اجرا شده و بهترین نتایج در این مقاله ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده برای قوانین فازی در جدول ۱ تا ۳ ارائه شده است. تابع هدف‌های مورد نظر برای تحلیل پایداری سیستم عبارتند از:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \int_{t=0}^{t=t_{sim}} (t \Delta \omega_i)^2 dt \quad (ب)$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^n \int_{t=0}^{t=t_{sim}} (\Delta \omega_i)^2 dt \quad (ب)$$

که n تعداد ژنراتورهای سیستم و t_{sim} زمان شبیه‌سازی می‌باشند. مقادیر این توابع هدف در جدول ۱۵ ارائه شده است.

جدول ۱- قوانین فازی تنظیم بهره K_{di}

	NB	NS	PS	PB
NB	PM	NS	PM	ZO
NS	PS	PM	NS	PB
Z	NM	PB	ZO	PB
PS	NB	PS	NS	NB
PB	PM	NB	PM	ZO

جدول ۲- قوانین فازی تنظیم بهره K_{fi}

	NB	NS	PS	PB
NB	NS	NM	PM	PB
NS	ZO	ZO	NB	PB
Z	PM	NM	NM	ZO
PS	NS	PB	NS	NB
PB	PM	ZO	NB	NB

باشد، هارمونی جدید داخل HM قرار گرفته و بدترین هارمونی موجود از مجموعه HM کنار گذاشته می‌شود.

بررسی ناحیه توقف

اگر ناحیه توقف یا همان حداکثر تعداد بداهه‌نوازی ارضا شد، محاسبات پایان یافته و در غیر اینصورت مراحل تولید هارمونی و به‌روزرسانی حافظه تکرار می‌گردند.

اعمال الگوریتم بر مساله پیشنهادی

در این مقاله مراحل زیر برای پایداری سیستم قدرت مورد نظر صورت می‌پذیرند:

- ۱- برقرار کردن پایداری سیستم به عنوان صورت مساله
- ۲- تعیین اولیه حافظه هارمونی با استفاده از معادله ۹ (قوانین فازی به عنوان حافظه هارمونی در نظر گرفته می‌شوند).
- ۳- تولید قوانین فازی جدید به عنوان هارمونی جدید با استفاده از معادله ۱۰ تا ۱۲
- ۴- به روز نمودن حافظه هارمونی بر اساس تابع هدف سیستم (معادله ۱۳ و ۱۴)
- ۵- بررسی شرط توقف الگوریتم

۴- نتایج شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی سیستم مورد استفاده در مرجع [۸] ارائه شده است. در این قسمت سیستم‌های مورد تست به همراه نتایج شبیه‌سازی ارائه شده‌اند. تمامی شبیه‌سازی‌ها و برنامه‌نویسی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است. برای عملکرد رله در این مقاله دو فرض در نظر گرفته شده است: ۱- یا رله حفاظتی عمل نمی‌کند (خط باقی می‌ماند). ۲- رله بعد از ۰.۰۹ عمل می‌کند

▪ سیستم استاندارد سه ماشینه IEEE

در این قسمت سیستم قدرت استاندارد ۹ باسه و سه ماشینه IEEE مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. شکل ۴ دیاگرام تک خطی این سیستم ارائه گردیده است. اطلاعات این سیستم در مرجع [۷] ارائه شده است.

شده است. در سیستم با در نظر گرفتن پایدارساز، مقادیر ویژه در جداول ۷ و ۸ ارائه شده که در دو مورد J_1 و J_2 ارائه گردیده است. در این جداول موارد اول و دوم عبارت است از شرایط بار مختلف که در جداول ۴-۵ ارائه گردیده است. همچنین در هر سطر ابتدا مقادیر ویژه به صورت اعداد مختلط نشان داده شده‌اند و بعد نسبت میرایی نوشته شده است. مقادیر ویژه ارائه شده برای کل سیستم می‌باشند و برای قسمت خاصی از سیستم قدرت نمی‌باشند. شکل ۵ نیز روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی با مقادیر اولیه مختلف ارائه گردیده است.

جدول ۳- قوانین فازی تنظیم بهره K_{pi}

	NB	NS	PS	PB
NB	PM	NS	PM	ZO
NS	PS	PM	NS	PB
Z	NM	PB	ZO	PB
PS	NB	PS	NS	NB
PB	PM	NB	PM	ZO

▪ تحلیل مقادیر ویژه

برای به چالش کشیدن کنترل‌کننده پیشنهادی در شرایط مختلف، دو مورد مطالعاتی در این سیستم در نظر گرفته شده است [۲۴]. هم‌چنین اطلاعات مربوط به بار ژنراتور در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. در جدول ۶ نیز مقادیر ویژه سیستم بدون در نظر گرفتن پایدارساز ارائه

جدول ۴- میزان بار تولید هر ژنراتور سیستم (100-MVA)

بار	بار پایه		مورد ۱		مورد ۲	
	P	Q	P	Q	P	Q
A	1.25	0.50	2.00	0.80	1.50	0.90
B	0.90	0.30	1.80	0.60	1.20	0.80
C	1.00	0.35	1.50	0.60	1.00	0.50

جدول ۵- میزان بار تولید ژنراتور

Gen.	بار پایه		مورد ۱		مورد ۲	
	P	Q	P	Q	P	Q
G_1	0.289	0.109	0.892	0.440	0.135	0.453
G_2	0.849	0.035	1.000	0.294	1.042	0.296
G_3	0.664	-0.085	1.000	0.280	1.172	0.298

جدول ۶- مقادیر ویژه و نسبت‌های میرایی بدون در نظر گرفتن پایدارساز

مورد مطالعاتی پایه	مورد اول	مورد دوم
$-0.02 \pm j 9.04, 0.001$	$-0.04 \pm j 8.87, 0.001$	$0.4 \pm j 8.83, -0.031$
$-0.8 \pm j 13.82, 0.052$	$-0.54 \pm j 13.79, 0.035$	$-0.36 \pm j 13.62, 0.022$

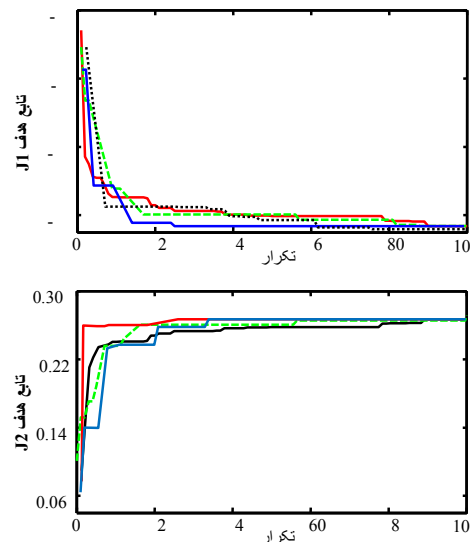
جدول ۷- مقادیر ویژه و نسبت‌های میرایی با در نظر گرفتن پایدارساز (J_1)

مورد مطالعاتی پایه	مورد اول	مورد دوم
$-3.65 \pm j 8.41, 0.382$	$-2.28 \pm j 7.6, 0.251$	$-2.55 \pm j 8.24, 0.215$
$-3.68 \pm j 18.37, 0.185$	$-4.09 \pm j 18.59, 0.235$	$-3.6 \pm j 18.51, 0.206$

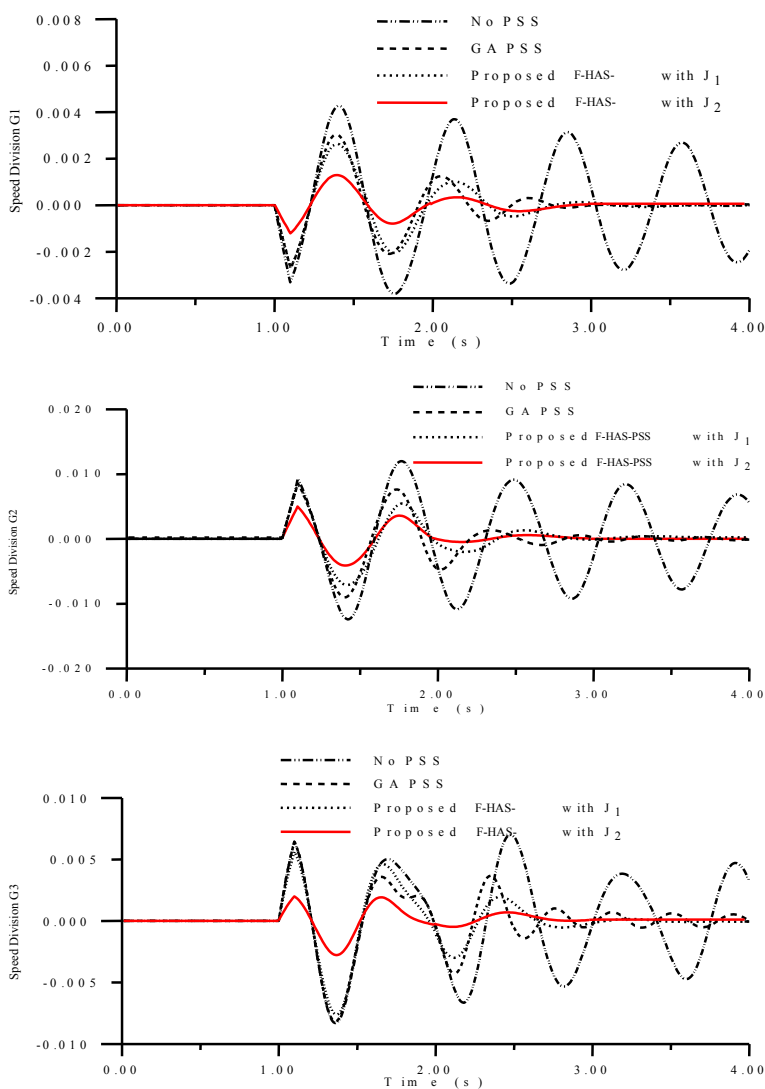
جدول ۸- مقادیر ویژه و نسبت‌های میرایی با در نظر گرفتن پایدارساز (J_2)

مورد مطالعاتی پایه	مورد اول	مورد دوم
$-2.05 \pm j 7.61, 0.246$	$-1.61 \pm j 7.51, 0.215$	$-1.47 \pm j 7.32, 0.139$
$-3.51 \pm j 13.06, 0.233$	$-2.33 \pm j 13.45, 0.161$	$-2.57 \pm j 12.72, 0.206$

رابطه نسبت میرایی و تحلیل آن در مرجع [۲۵] ارائه شده است. در این مورد مطالعاتی، خطای سه فاز در خط ۵-۷ و در باس ۷ که همان ابتدای باس ۷ می‌باشد، خواهیم داشت که در ثانیه ۱ اتفاق می‌افتد. ملاحظه می‌شود که پاسخ سیستم با تکنیک پیشنهادی بهترین جواب برای شرایط مورد اول را نشان می‌دهد نتایج شبیه‌سازی با مرجع [۳-۲] مقایسه شده است.



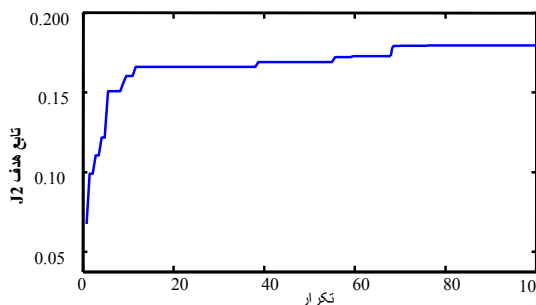
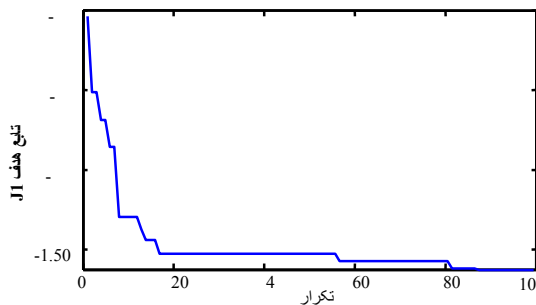
شکل ۵- همگرایی تایع هدف با مقادیر اولیه مختلف



شکل ۶- پاسخ سیستم به اتصال کوتاه سه‌فاز در خط ۵-۷ و باس ۷ در مورد اول

جدول ۱۱- قوانین فازی تنظیم بهره K_{pi}

	NB	NS	PS	PB
NB	NM	NB	ZO	PB
NS	PS	PM	NS	NS
Z	ZO	PB	PB	ZO
PS	PS	PM	NS	PB
PB	ZO	NM	PS	PS



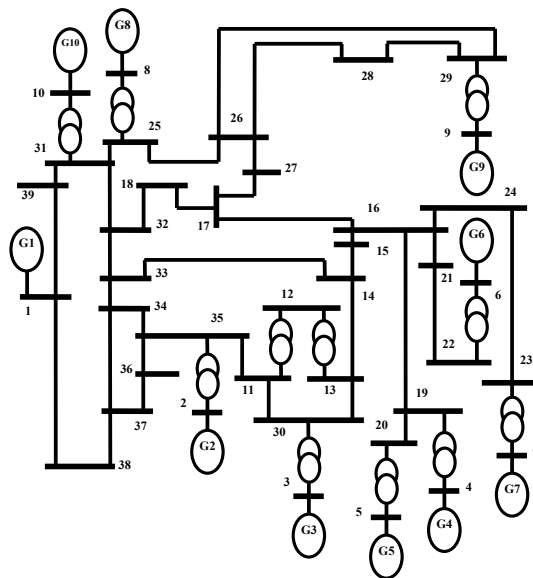
شکل ۸- همگرایی الگوریتم هارمونی

تحلیل مقادیر ویژه

در این مورد مطالعاتی نیز برای نشان دادن قدرت کنترل-کننده پیشنهادی در دو حالت مورد تست و آزمایش قرار گرفته است [۲۴-۲۵]. در حالت اول خروج خط ۲۱-۲۲ در نظر گرفته شده و در حالت دوم خروج خط ۱۴-۱۵ مورد مطالعه قرار گرفته است. در جدول ۱۲ مقادیر ویژه سیستم بدون در نظر گرفتن پایدارساز ارائه شده است. با در نظر گرفتن پایدارساز، مقادیر ویژه در جداول ۱۳ و ۱۴ ارائه شده که در دو مورد J_1 و J_2 ارائه گردیده است. هم-چنین در هر سطر ابتدا مقادیر ویژه به صورت اعداد مختلط نشان داده شده‌اند و بعد نسبت میرایی نوشته شده است. مقادیر ویژه ارائه شده برای کل سیستم می‌باشند و برای قسمت خاصی از سیستم قدرت نمی‌باشند. موارد مذکور عبارت است از شرایط بهره‌برداری مختلف که در مراجع [۲۴-۲۵] ارائه گردیده است.

سیستم قدرت New-England

در این قسمت کنترل‌کننده پیشنهادی بر روی سیستم قدرت ۳۹ باسه و ۱۰ ماشینه که در شکل ۷ نشان داده شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. این سیستم در شرایط بار نامی، سبک و سنگین و در سناریوهای مختلف مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. هم‌چنین مشخصات مربوط به سیستم در مرجع [۷] ارائه شده است. نتایج بدست آمده برای قوانین فازی در جدول ۹ تا ۱۱ ارائه شده است. شکل ۷ نیز روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی با مقادیر اولیه مختلف ارائه گردیده است.



شکل ۷- سیستم قدرت ۳۹ باسه ۱۰ ماشینه

جدول ۹- قوانین فازی تنظیم بهره K_{di}

	NB	NS	PS	PB
NB	NM	NB	ZO	PB
NS	PS	PM	NS	NS
Z	ZO	PB	PB	ZO
PS	PS	PM	NS	PB
PB	ZO	NM	PS	PS

جدول ۱۰- قوانین فازی تنظیم بهره K_{fi}

	NB	NS	PS	PB
NB	NS	PM	PM	ZO
NS	PB	ZO	NB	PB
Z	PM	NM	NS	ZO
PS	NS	PB	NS	NB
PB	PM	NS	NB	NM

جدول ۱۲- مقادیر ویژه و نسبت‌های میرایی بدون در نظر گرفتن پایدارساز

مورد مطالعاتی پایه	مورد اول	مورد دوم
0.189 ±j 5.805, -0.030	0.193 ±j 5.711, -0.033	0.150 ±j 5.762, -0.022
0.087 ±j 4.004, -0.020	0.120 ±j 3.793, -0.033	0.091 ±j 3.833, -0.024
-0.029 ±j 9.648, 0.001	0.095 ±j 6.002, -0.015	0.030 ±j 6.853, -0.004
-0.035 ±j 6.412, 0.002	-0.035 ±j 9.690, 0.001	-0.020 ±j 9.660, 0.002
-0.057 ±j 7.134, 0.005	-0.105 ±j 8.011, 0.011	-0.090 ±j 8.122, 0.011
-0.095 ±j 8.114, 0.009	-0.110 ±j 6.512, 0.015	-0.099 ±j 6.033, 0.016
-0.174 ±j 9.689, 0.015	-0.170 ±j 9.712, 0.015	-0.170 ±j 9.694, 0.015
-0.222 ±j 8.011, 0.026	-0.205 ±j 8.056, 0.022	-0.220 ±j 8.002, 0.022
-0.272 ±j 9.337, 0.026	-0.252 ±j 9.267, 0.021	-0.260 ±j 9.323, 0.025

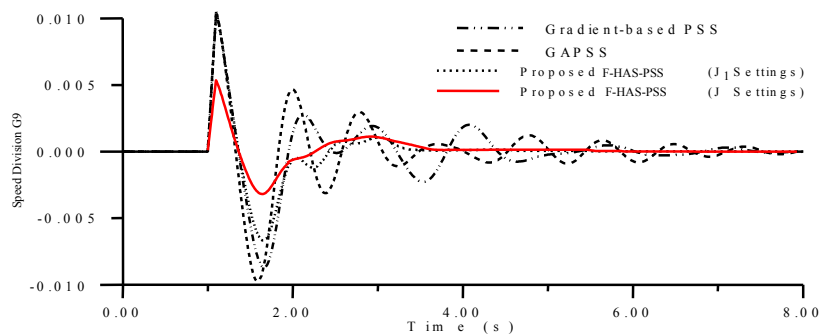
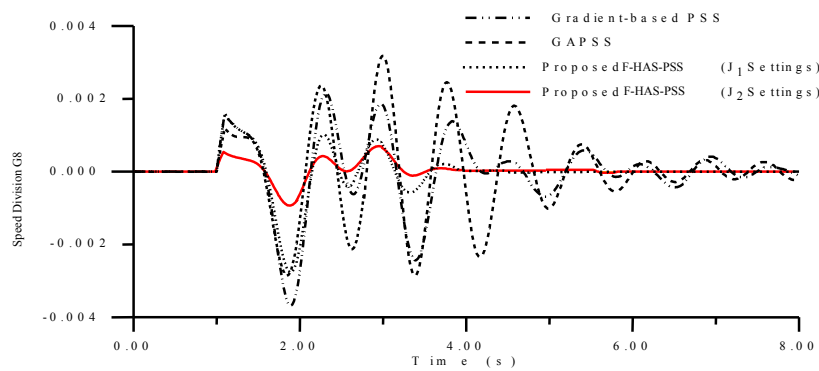
جدول ۱۳- مقادیر ویژه و نسبت‌های میرایی با در نظر گرفتن پایدارساز (J_1)

مورد مطالعاتی پایه	مورد اول	مورد دوم
-1.733 ±j 2.851, 0.518	-1.430 ±j 3.132, 0.416	-1.543 ±j 2.641, 0.513
-1.753 ±j 12.481, 0.138	-1.542 ±j 9.941, 0.155	-1.624 ±j 9.657, 0.117
-1.765 ±j 9.772, 0.170	-1.776 ±j 12.445, 0.137	-1.754 ±j 12.235, 0.114
-1.754 ±j 9.992, 0.170	-1.754 ±j 10.565, 0.162	-1.763 ±j 10.565, 0.173
-1.763 ±j 8.240, 0.211	-1.787 ±j 12.185, 0.142	-1.763 ±j 10.466, 0.156
-1.755 ±j 10.948, 0.154	-1.893 ±j 9.955, 0.185	-1.794 ±j 10.563, 0.163
-1.882 ±j 10.173, 0.150	-1.951 ±j 9.053, 0.228	-1.832 ±j 7.347, 0.243
-1.850 ±j 12.238, 0.152	-2.140 ±j 10.655, 0.193	-1.835 ±j 12.665, 0.154
-2.273 ±j 9.840, 0.226	-2.268 ±j 7.453, 0.294	-2.368 ±j 9.841, 0.236

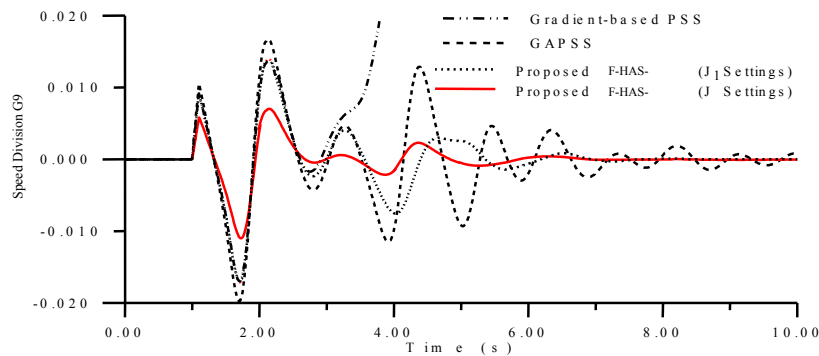
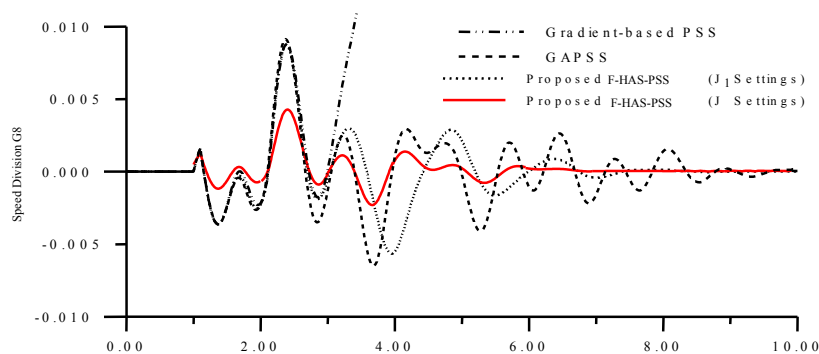
جدول ۱۴- مقادیر ویژه و نسبت‌های میرایی با در نظر گرفتن پایدارساز (J_2)

مورد مطالعاتی پایه	مورد اول	مورد دوم
-0.783 ±j 2.825, 0.264	-0.695 ±j 2.953, 0.234	-0.734 ±j 2.735, 0.235
-1.402 ±j 5.155, 0.265	-0.935 ±j 4.445, 0.213	-1.415 ±j 5.073, 0.265
-1.538 ±j 8.122, 0.185	-1.455 ±j 9.035, 0.165	-1.542 ±j 9.425, 0.124
-1.762 ±j 9.127, 0.186	-1.674 ±j 8.002, 0.205	-1.552 ±j 7.413, 0.204
-1.732 ±j 9.755, 0.175	-2.094 ±j 10.243, 0.195	-2.147 ±j 9.645, 0.225
-2.132 ±j 12.335, 0.173	-2.275 ±j 12.113, 0.185	-2.144 ±j 10.277, 0.204
-2.172 ±j 10.325, 0.205	-2.236 ±j 12.655, 0.173	-2.165 ±j 12.174, 0.174
-2.255 ±j 12.462, 0.172	-2.244 ±j 9.335, 0.224	-2.155 ±j 12.494, 0.175
-2.532 ±j 13.735, 0.175	-2.624 ±j 13.275, 0.185	-2.645 ±j 13.774, 0.187

- برای تحلیل پاسخ کنترل‌کننده پیشنهادی در شرایط مختلف، سیستم مورد نظر در برابر دو نوع خطای سه فاز قرار می‌گیرد که عبارتند از:
- خطای اول خطای سه فاز در ابتدای باس ۲۹ در انتهای خط ۲۶-۲۹
 - خطای دوم خطای سه فاز در ابتدای باس ۱۴ در انتهای خط ۱۴-۱۵
- که هر کدام از خطاهای سه فاز برای موارد مختلف بهره‌برداری در [۲۴-۲۵] اعمال شده‌اند. شکل ۹ و ۱۰ پاسخ ژنراتورهای سیستم مورد نظر را در شرایط بهره‌برداری خطای اول و دوم را نشان می‌دهند.



شکل ۹: پاسخ سیستم به خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در خط ۲۶-۲۰ و باس ۲۹



شکل ۱۰: پاسخ سیستم به خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در خط ۱۴-۱۵ و باس ۱۴

جدول ۱۵- پاسخ شاخص عملکرد سیستم در اغتشاش‌های مختلف

اغتشاش [۲۴]	Gradient-based PSS [۲۴]		GAPSS [۲۴]		F-HAS-PSS			
	J_1	J_2	J_1	J_2	J_1		J_2	
					A_1	A_2	A_1	A_2
1	2.44	1.05	2.86	1.09	0.41	0.31	0.40	0.40
2	3.39	1.08	3.33	1.11	0.42	0.95	0.42	0.50
3	2.30	1.06	2.66	1.08	0.32	0.50	0.48	0.47
4	----	----	65.5	8.61	51.3	22.4	6.44	4.13
5	----	----	65.2	8.64	37.7	37.2	5.67	5.71

۵- نتیجه‌گیری

طراحی و بهینه‌سازی قوانین کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی در سیستم قدرت چند ماشینه در این مقاله ارائه شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی یکی از روش‌های مناسب برای پایداری در سیستم‌های غیرخطی می‌باشد که با انتخاب بهینه قوانین فازی با الگوریتم جستجوی هارمونی به یک کنترل‌کننده مقاوم تبدیل شده است. الگوریتم پیشنهادی هارمونی نیز یک روش مناسب بهینه‌سازی می‌باشد که به دنبال یافتن بهترین جواب شرایط سیستم را در نظر گرفته پایداری را در سیستم برقرار می‌کند. به این منظور کنترل‌کننده پیشنهادی در نقاط کار مختلف بر روی سیستم قدرت استاندارد سه ماشینه IEEE و ده ماشینه New-England مورد آزمایش قرار گرفت. سیستم‌های قدرت پیشنهادی در شرایط بهره‌برداری مختلف مورد تست قرار گرفتند. همچنین برای تحلیل بیشتر توابع هدف مختلفی برای این سیستم‌ها تعریف و محاسبه شدند. با توجه به نتایج به‌دست آمده و مقایسه آن با روش‌های دیگر می‌توان گفت که کنترل‌کننده در نقاط کار مختلف دارای عملکرد مناسبی می‌باشد.

در جدول بالا پارامترهای A_1 و A_2 عبارتند از:

$$A_1 = \max\{\text{Real}(\lambda_i) : \lambda_i \in \text{electromechanical modes}\}$$

$$A_2 = \min\{\zeta_i : \zeta_i \in \zeta_s \text{ of electromechanical modes}\}$$

که λ_i و ζ_i به ترتیب قسمت حقیقی و نسبت میرایی برای i^{th} حالت الکترومکانیکی و مقدار ویژه می‌باشند. با توجه به نتایج عددی بدست آمده در جداول بالا این نکته بدیهی است که مقادیر توابع هدف در روش پیشنهادی کمتر از روش‌های دیگر می‌باشد. مقدار کمتر تابع هدف به معنی نوسان کمتر خروجی سیستم و میرا شدن آن در حداقل زمان می‌باشد. همچنین از مقایسه مقادیر ویژه بدست آمده با منابع مورد مقایسه به این نکته می‌توان دریافت که روش پیشنهادی مقادیر ویژه مناسب با نسبت میرایی کمتر را بدست آورده است. لذا بدیهی است که عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در شرایط بهره‌برداری و اغتشاشات وارده مختلف بهتر از دیگر کنترل‌کننده‌های مورد آزمایش بوده است. به‌طوریکه کنترل‌کننده پیشنهادی در این مقاله از عملکرد مناسبی جهت میرا کردن نوسانات و اختلالات وارده بر سیستم برخوردار می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] Basler, M. J., Schaefer, R. C., (2008), "Understanding Power System Stability", IEEE Trans. Industry Applications, 2008, Vol. 44, pp. 463-474.

- [2] Abe, S. and Doi, A., (1983), "A New Power System Stabilizer Synthesis in Multimachine Power Systems," *IEEE Trans. PAS*, Vol. 102, No. 12, pp. 3910-3918.
- [3] Yu, Y. N. and Li, Q., (1990), "Pole-Placement Power System Stabilizers Design of an Unstable Nine-Machine System," *IEEE Trans. PWRD*, Vol. 5, No. 2, pp. 353-358.
- [4] Padiyar, K. R., (2006), "Power System Dynamics, Stability and Control", Second Ed..
- [5] Kundur, P., (1994), "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., New York.
- [6] El-Zonkoly, A. M., Khalil, A. A. and Ahmied, N. M., (2008), "Optimal Tuning of Lead-Lag and Fuzzy Logic Power System Stabilizers Using Particle Swarm Optimization", *Expert System with Applications*, Vol. 10, pp. 1-10.
- [7] Abedinia, O., Amjady, N., Izadfar, H.R., Shayanfar, H.A., (2012), "Multi-machine Power System Oscillation Damping: Placement and Tuning PSS VIA Multi-objective HBMO", "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE), Issue. 12, Vol. 4, No. 3, pp:1-8.
- [8] Abedinia, O., Jalili, A., (2011), "Optimal Rule-Base in Multi-Machine Fuzzy PSS Using Genetic Algorithm", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 10, pp: 1424-1434.
- [9] James, M. A., (2001), "Multi-stage fuzzy PID controller with fuzzy switch". In: *Proceeding of the IEEE international conference on control application*, vol. 4, p: 323-27.
- [10] Hwang, J. H., Kim, D. W., Lee, J. H. and An, Y. J., (2008), "Design of Fuzzy Power System Using Adaptive Evolutionary Algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 21, pp. 86-96.
- [11] Abdel-Magid, Y. L., Abido, M. A., (2003), "Optimal Multi-objective Design of Robust Power System Stabilizers Using Genetic Algorithms", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 18, No. 9. PP. 256-267.
- [12] Glover, F., (1990), "Artificial Intelligence Heuristic Frameworks and Tabu Search", *Managerial and Decision Economics*, Vol. 11, No 2. PP. 365-375.
- [13] Chhawali, S., Pahwa, A. and Das, S.. (2002), "A Genetic Algorithm Approach for Optimal Distribution Feeder Restoration Duting Cold Load Pickup" , In *proc. Of the 2002 congress on evolutionary computation*, Vol. 5, No. 4, PP. 1816-1819.
- [14] Segal, R., Sharma, A., Kothari, M. L., (2004), "A Self-tuning Power System Stabilizer Based on Artificial Neural Network", Vol. 26, pp. 423-430.
- [15] Vasebi, A., Fesanghary, M., Bathaee, S.M.T., (2007), "Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm", *Electrical Power Energy Syst* Vol. 29, no. 10, pp. 713-719.
- [16] Hyun Hwang, G., Xan Kim, D., Hyne. Lee, J. and Joo, Y. An, (2008), "Design of Fuzzy Power System Stabilizer Using Adaptive Evolutionary Algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, No. 6, PP. 86-96.
- [17] Kazimi, A., Sohrforouzani, M. V., (2006), "Power System Damping Using Fuzzy Controlled Facts Devices", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 28, No. 2, PP. 349-357.
- [18] Tang, K. S., Man, K. F., Chen, G., Kwong, S., (2001), "A GA-optimized Fuzzy PID Controller For Nonlinear Systems", *The 27th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, Vol. 20. No. 5, PP. 718-723.
- [19] Cheong, F., Lai, R., (2000), "Constraining the Optimization of a Fuzzy Logic Controller Using an Enhanced Genetic Algorithm", *IEEE Transactions on Systems, MAN, and Cybernetics*, Vol. 30, No. 1.
- [20] Juang, C. F., Lu, C. F., (2002), "Power System Load Frequency Control with Fuzzy Gain Scheduling Designed by New Genetic Algorithms", *IEEE International Conference on Plasma Science*, Vol. 1, No. 7, PP.64-68.

- [21] Geem, ZW., Tseng, C., Park, Y., (2005), "Harmony search for generalized orienteering problem", best touring in China. Springer Lect Notes Comput Sci, pp. 741–7150.
- [22] Abedinia, O., Barazande, Ebrahim S., Amjady, N., (2012), "Solving Optimal Unit Commitment Problem Based on Wind Power Effects Using Harmony Search Algorithm", International Journal of Basic and Applied Science (IJBAS), Vol. 2, No. 11, pp: 11764-11773.
- [23] Geem, ZW., Kim, JH., Loganathan, GV., (2002), "Harmony search optimization: application to pipe network design, Int J Model Simulat., vol. 22, no. 2, pp. 125–133.
- [24] Maslennikov, V. A. and Ustinov, S. M., (1996), "The Optimization Method for Coordinated Tuning of Power System Regulators," Proc. 12th Power System Computation Conference PSCC, Dresden,, pp. 70-75.
- [25] Abdel-Magid, Y. L., Abido, M. A., Al-Baiyat, S., and Mantawy, A. H., (1999), "Simultaneous Stabilization of Multimachine Power Systems via Genetic Algorithms," IEEE Trans. PWRS, Vol. 14, No. 4, pp. 1428-1439.