

# طراحی کنترل کننده فازی عصبی مبتنی بر تابع انرژی برای STATCOM به منظور بهبود پایداری گذرا در سیستم تک ماشینه با باس بی نهایت

ابراهیم نصرافهانی<sup>۱</sup>، سعید اباذری<sup>۲</sup>، غلامرضا عرب<sup>۳</sup>  
<sup>۱</sup>-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد نجف آباد، ebrahimnasresfahani@gmail.com  
<sup>۲</sup>-استادیار، گروه برق، دانشگاه شهرکرد، saeedabazari@yahoo.com  
<sup>۳</sup>-استادیار، گروه برق، دانشگاه شهرکرد، arab-gh@eng.sku.ac.ir

## چکیده

در این مقاله یک کنترل کننده فازی عصبی برای جبران کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM) به منظور افزایش زمان بحرانی رفع خطا و میرایی بهتر نوسانات سیستم بعد از یک خطای اتصال کوتاه ارائه شده است. برای تحقق این ایده در ابتدا یک کنترل کننده براساس تابع انرژی لیاپانوف طراحی می گردد، برای غلبه بر نامعینی های سیستم و به دلیل پیچیدگی محاسبات یک کنترل کننده فازی عصبی پیشنهاد می گردد. شبکه عصبی در اینجا قوانین و توابع عضویت سیستم فازی را مشخص می کند. برای بدست آوردن اطلاعات آموزش دهنده شبکه عصبی از الگوهای آموزشی مربوط به کنترل کننده تابع انرژی در نقاط کار مختلف استفاده شده است. این کنترل کننده به واسطه فازی بودن مقاوم در نامعینی و به دلیل عصبی بودن دارای قابلیت آموزش پذیری می باشد. نتایج شبیه سازی روش طرح شده بر روی سیستم تک ماشینه با باس بی نهایت (SMIB) درستی این روش را تأیید می کند.

## واژه های کلیدی

پایداری گذرا، STATCOM و تابع انرژی لیاپانوف، فازی عصبی

## ۱- مقدمه

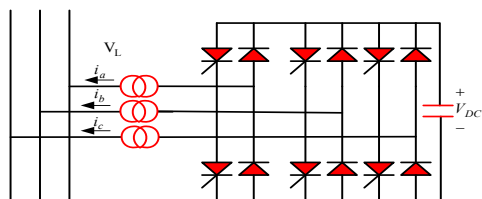
پیشرفت های اخیر در زمینه الکترونیک قدرت توان بالا، علاقه به استفاده از این عناصر در شبکه های ولتاژ بالا تحت عنوان ادوات سیستم های انتقال متناوب انعطاف (FACTS) افزایش داده است. این عناصر نه تنها در حالت ماندگار می توانند باعث بهبود عملکرد سیستم های قدرت شوند، بلکه به واسطه سرعت بالای خود نیز می توانند در برابر اغتشاشات وارد بر سیستم، نقش میراکننده نوسانات سیستم نیز ایفا می کنند [۱].

در میان عناصر FACTS جبران کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM) نقش مؤثری در حل مشکلات محدوده وسیعی از سطوح انتقال تا توزیع از خود نشان داده است. ساختار داخلی این جبران کننده از یک مبدل قدرت، یک مجموعه از راکتورهای متصل یا یک ترانسفورماتور افزایشنده و یک سیستم کنترلی تشکیل شده است. تاکنون تلاش های زیادی برای طراحی کنترل کننده برای این عنصر به منظور بهبود پایداری سیستم و میرای نوسانات الکترومکانیکی انجام شده است [۲ - ۶].

کنترل کننده های طراحی شده را می توان از نظر نوع پایداری در دو دسته قرار داد؛ دسته اول کنترل کننده هایی هستند که برای بهبود پایداری دینامیکی طراحی شده است. این کنترل کننده به طور

پیشرفت های اخیر در زمینه الکترونیک قدرت توان بالا، علاقه به استفاده از این عناصر در شبکه های ولتاژ بالا تحت عنوان ادوات سیستم های انتقال متناوب انعطاف (FACTS) افزایش داده است. این عناصر نه تنها در حالت ماندگار می توانند باعث بهبود عملکرد سیستم های قدرت شوند، بلکه به واسطه سرعت بالای خود نیز می توانند در برابر اغتشاشات وارد بر سیستم، نقش میراکننده نوسانات سیستم نیز ایفا می کنند [۱].

در میان عناصر FACTS جبران کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM) نقش مؤثری در حل مشکلات محدوده وسیعی از



شکل ۱- ساختار داخلی STATCOM

همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است شامل یک مبدل از نوع GTO و یک لینک DC است. لینک DC در ساده ترین فرم آن فقط یک خازن را شامل می شود [۱].

نمایش تک فاز یک سیستم قدرت تک ماشینه و باس بی نهایت که با یک STATCOM در شکل (۲) نشان داده شده است. نکته اصلی در مدل کردن این عنصر سیستم این است که می توان با توجه به عملکرد STATCOM، آن را مانند یک منبع جریان مدل سازی نمود که معمولاً آن را برای کارایی بیشتر به صورت راکتیو در نظر می گیرند. به این ترتیب STATCOM جریان پس یا پیش فاز به سیستم قدرت تزریق نماید. دلیل این مدل سازی در این مرحله آن است که STATCOM دارای این توانایی است که هر شکل موج سینوسی دلخواه را برای جریان در زمان بسیار کوتاه و با دقت مناسب و تقریباً مستقل از ولتاژ ترمینال خود ( $V_m$ ) تولید نماید. در شکل شماره (۲) STATCOM به صورت یک منبع جریان راکتیو موازی نمایش داده شده است. ( $I_s = I_s e^{j\delta_k \pm 90^\circ}$ ) [۶].

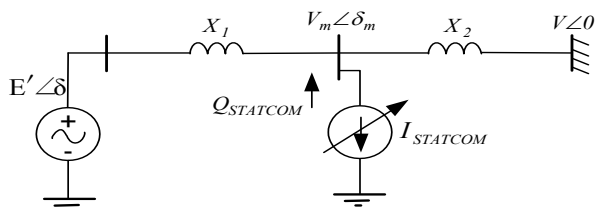
ولتاژ داخلی ماشین به صورت  $E' \angle \delta$  و ولتاژ باس بی نهایت  $V \angle \delta$  معلوم است. دامنه ولتاژ و زاویه باس  $lm$  ای STATCOM می توان نوشت [۶].

$$V_m = \frac{E'X_2 \cos(\delta - \delta_m) + VX_1 \cos \delta_m + X_1 X_2 I_{STATCOM}}{X_1 + X_2} \quad (1)$$

$$\delta_m = \tan^{-1} \left( \frac{E'X_2 \sin \delta}{VX_1 + E'X_2 \cos \delta} \right) \quad (2)$$

و توان خروجی می تواند به صورت (۳) بدست آید.

$$P_c = \frac{E'V_m}{X_1} \sin(\delta - \delta_m) \quad (3)$$



شکل ۲- سیستم تک ماشینه با باس بی نهایت در حضور STATCOM

هم زمان برای میرایی نوسانات سیستم و تنظیم ولتاژ تحت یک اغتشاش کوچک طراحی شده است. در مقالات مختلف این نوع کنترل کننده به صورت خطی و غیرخطی پیشنهاد شده است [۲ و ۵ و ۸] ساده ترین مدلی که برای STATCOM در نظر گرفته شده است از دو کنترل کننده PI تشکیل شده است، در این مدل دو کنترل کننده ولتاژ AC و ولتاژ DC پشت سر هم قرار می گیرند که به صورت خطی عمل می کند [۹].

برای بهبود عملکرد کنترل کننده روش های غیرخطی نظیر کنترل کننده عصبی از نوع RBF که در [۵] پیشنهاد شده اشاره کرد. از نمونه کارهای دیگر از این دست کنترل کننده چندمتغیره ای برای کنترل ولتاژ DC و AC استفاده شده است. تا تأثیر منفی متقابل بین این دو کنترل کننده را از بین ببرد [۲].

دسته دوم کنترل کننده ها با استفاده از روش مستقیم برای بهبود پایداری گذرا و اولین نوسان سیستم قدرت و به تبع منجر به افزایش زمان بحرانی رفع خط است. کنترل کننده مختلفی از این دسته نظیر کنترل فازی با استنتاج ممدانی و کنترل کننده مبتنی بر قانون نیز برای بهبود پایداری گذرا طراحی شده است، بعضی از قوانین استفاده شده در طراحی این کنترل کننده براساس تابع انرژی لیاپانوف قابل توجه است [۳ و ۴]. اما تعدادی قوانین کم اثر و بی اثر نیز دیده می شود.

در این مقاله کنترل کننده هوشمندی برای ایجاد قوانین طراحی شده است. استفاده از شبکه عصبی به دلیل آموزش پذیری می تواند در اصلاح قوانین و بازه های توابع عضویت فازی بسیار مؤثر باشد. بنابراین در این مقاله در ابتدا کنترل کننده ای براساس تابع انرژی لیاپانوف (EFC) طراحی و به وسیله آن می توان الگوهای آموزشی برای شبکه عصبی بدست آورد. در واقع شبکه عصبی با استفاده از این بردارهای آموزشی کنترل کننده تابع انرژی، سیستم به گونه ای آموزش می دهد که بتواند با تغییر شرایط کاری، بتواند به صورت بلادرنگ کارایی لازم را داشته باشد.

این مقاله یک استراتژی کنترل برای STATCOM بر روی یک سیستم تک ماشینه پیشنهاد کرده است که علاوه بر برآورده کردن معیار پایداری لیاپانوف، توانایی تطبیق پذیری با شرایط و قابلیت آموزش را نیز دارد.

## ۲- جبران کننده سنکرون استاتیکی

جبران کننده سنکرون استاتیکی اولین کنترل کننده موازی براساس مبدل قدرت می باشد. این عنصر محدودیت های ناشی از کموتاسیون طبیعی که در موجود در SVC ندارد و به صورت کموتاسیون اجباری کاری می کند.

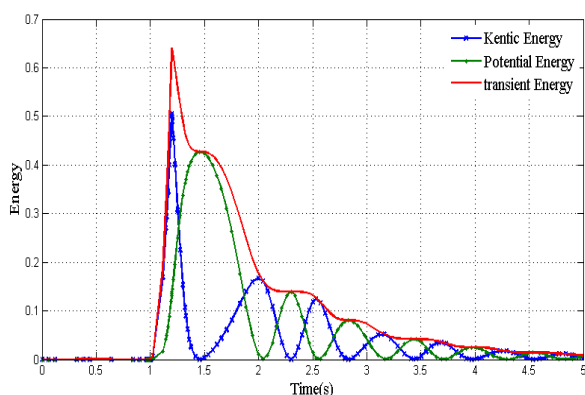
سرعت صفر میل دهد، چرا که به صفر رساندن تابع انرژی لیاپانوف در حقیقت نشانگر رسیدن سیستم به وضع تعادل است. در صورتی میرایی سیستم صفر باشد مقدار مشتق تابع انرژی با وجود کنترل کننده به صورت (۵) محاسبه می گردد [۶].

$$\dot{V} = -cI_s \omega \sin(\delta - \delta_k) \quad (5)$$

از رابطه (۵) می توان اثبات کرد، چنانچه در هر لحظه علامت  $I_{statcom}$  با علامت  $\frac{\delta}{2} \sin(\omega - \omega_s)$  یکسان باشد. انرژی سیستم به صفر میل می کند. بنابراین این کنترل کننده برای STATCOM به صورت (۶) قابل پیاده سازی است:

$$I_{STATCOM} = K(\omega - \omega_s) \sin \frac{\delta}{2} \quad (6)$$

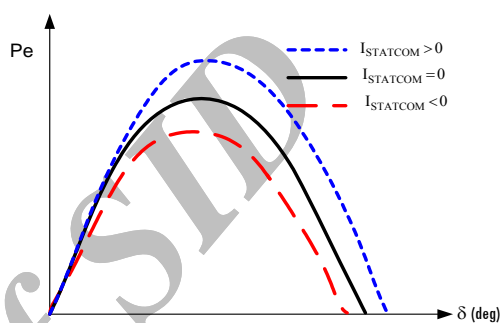
K یک ثابت مثبت که به مقادیر نامی STATCOM بستگی دارد. در شکل (۴) تأثیر وجود STATCOM بر کاهش انرژی سیستم بعد از وقوع خطا با روش کنترلی فوق نشان داده شده است. در این شکل تغییرات انرژی پتانسیل، انرژی جنبشی سیستم و انرژی گذرای کل سیستم بعد از خطای اتصال کوتاه با وجود کنترل کننده EFC برای STATCOM نشان می دهد. آنچه مشخص است در ابتدا به دلیل اینکه سیستم در حالت ماندگار قرار دارد مقدار انرژی سیستم صفر است، بعد از خطا سیستم با وجود جبران کننده، مقدار تابع انرژی سیستم کاهش می یابد. هرچه قدرت STATCOM بیشتر باشد انرژی سیستم بیشتر کاهش می یابد و باعث افزایش میرایی سیستم نیز می گردد.



شکل ۴ - تأثیر کنترل کننده EFC برای STATCOM بر کاهش انرژی گذرا سیستم پس از خطا

شکل (۵) نمودار صفحه فاز سیستم نشان می دهد. مشاهده می شود که سیستم پس از خطا به نقطه تعادل پایدار بر می گردد. در قسمت بعدی مقاله با استفاده از سیستم روش فازی - عصبی کنترل کننده خود تنظیمی برای مقاوم نمودن سیستم در برابر نامعینی ارائه می گردد.

کنترل کننده های FACTS می توانند برای بهبود پایداری گذرا در سیستم های قدرت بکار برده شوند. اثر این گونه ادوات در بهبود پایداری گذرا از روی معادلات نوسان و نیز روش سطوح معادل قابل توضیح می باشد [۱۱]. مطابق شکل (۳) جبران کننده سنکرون استاتیکی نیز می تواند بر پایداری سیستم از طریق افزایش و کاهش توان انتقالی در مد خازنی و سلفی آن بر روی پایداری سیستم تأثیر به سزایی داشته باشد.



شکل ۳ - منحنی مشخصه سیستم در حضور STATCOM

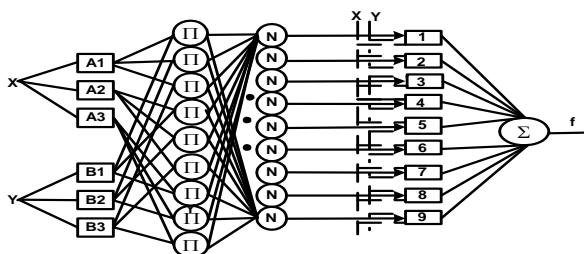
### ۳- طراحی کنترل کننده براساس تابع انرژی لیاپانوف (EFC)

یکی از ابزارهای ارزیابی پایداری سیستم و طراحی کنترل کننده استفاده از تابع لیاپانوف است. مطابق قضیه لیاپانوف چنانچه تابع اسکالری مانند  $V(X)$  وجود داشته باشد به طوری که در تمام نقاط همواره مقدار تابع  $V(X)$  نیمه معین مثبت و  $\dot{V}(X)$  نیمه معین منفی باشد. سیستم در نزدیکی نقطه تعادل پایدار مجانبی است [۸]. در سیستم های قدرت تابع لیاپانوف، مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم است. در این مقاله با بدست آوردن تابع انرژی برای سیستم تک ماشینه با باس بی نهایت در حضور جبران کننده کنترل کننده مناسبی برای STATCOM طراحی می گردد که معیار پایداری لیاپانوف را برآورده سازد. از نظر مرجع [۱۱] تابع انرژی  $V(X)$  به صورت (۴) محاسبه می گردد.

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2} M \omega^2 + [-P_m(\delta - \delta_s) - P_{max}(\cos \delta - \cos \delta_s)] \quad (4)$$

در اینجا  $\delta_s$  زاویه در نقطه تعادل پایدار پس از خطا است در تعریف این تابع، جمله اول معرف انرژی جنبشی سیستم و دومین جمله بیانگر انرژی پتانسیل سیستم نسبت به نقطه تعادل ماندگار  $\delta_s$  می باشد. طبق رابطه (۴) مقدار تابع انرژی لیاپانوف، در نقطه تعادل ماندگار برابر صفر است. بعد از ایجاد خطا در سیستم مقدار تابع انرژی سیستم شروع به افزایش می کند، برای بهبود پایداری سیستم، کنترل کننده بایستی مقدار تابع انرژی سیستم به

لایه چهارم: خروجی این لایه از ضرب شدن خروجی لایه سوم در یک چند جمله‌ای مرتبه اول (سوگینو مرتبه اول) تشکیل می‌یابد. لایه پنجم: مجموع عبارت‌های لایه چهارم تشکیل یافته است. با استفاده از روش ANFIS شبکه را آموزش داده و کنترل کننده می‌تواند با تغییر نقطه کار پاسخ مناسبی داشته باشد.



شکل ۶- ساختار ANFIS [۱۰].

#### ۵- طراحی کنترل کننده فازی عصبی FNC برای

##### STATCOM و مقایسه با EFC

سیگنال ورودی در این کنترل کننده زاویه داخلی ژنراتور و تغییرات سرعت در نظر گرفته شده است سیگنال خروجی جریان تزریقی جبران ساز سنکرون استاتیکی متناسب با دو بردار ورودی می‌باشد به منظور بدست آوردن الگوهای آموزشی شبکه عصبی، کنترل کننده EFC در شرایط کاری زیر بکار گرفته می‌شود.

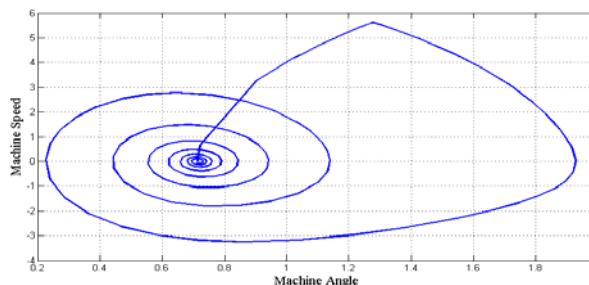
(الف) در محل‌های مختلف خطای اتصال کوتاه بر سیستم وارد می‌شود.

(ب) ظرفیت STATCOM: در رنج ۱/۲ تا ۱/۲ ظرفیت نامی به سیستم وارد می‌شود.

(ج) مدت زمان خطا: از زمان ۱۵۰ میلی ثانیه تا زمان‌های بحرانی خطا

(د) ترکیبی‌های متفاوتی از سه حالت فوق

با شرایط مختلف کاری فوق می‌توان ۵۰ جفت الگوی ورودی خروجی بدست آورد، این ۵۰ الگو می‌توانند معیار تابع لیاپانوف به خوبی برآورده کنند. به طوری که هر خروجی تابعی از دو بردار ورودی است. شبکه عصبی با استفاده از سیگنال‌های ورودی و خروجی که به ترتیب یک ماتریس  $2 \times 50$  و  $1 \times 50$  هستند سیستم را طوری تعلیم می‌دهد که منجر به بدست آوردن قوانین و بازه‌های توابع عضویت و در نهایت پاسخ بهتر کنترل کننده می‌گردد. بعد از فرآیند آموزش منحنی سطح برای این کنترل فازی - عصبی مطابق شکل (۷) بدست می‌آید.



شکل ۵- نمودار صفحه فاز سیستم با روش EFC

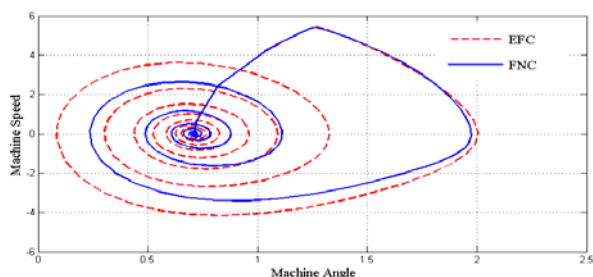
#### ۴- کنترل فازی عصبی

برای بهبود عملکرد کنترل کننده طراحی شده در قسمت قبل در برابر تغییرات نقطه کار، انتخاب روش استنتاج فازی روش مناسبی به نظر آید. اما برای تعیین قوانین کنترل کننده فازی باید به دنبال یک روش کارآمد بود. در کارهای مشابه قبلی انجام شده برای بدست آوردن قوانین فازی از قاعده‌های استنباط شده از تابع انرژی سیستم استفاده شده است [۳ و ۴]. می‌توان برای بدست آوردن قوانین به صورت خود تنظیم از یک روش ترکیبی استفاده شود. اگر خاصیت تطبیقی و قابلیت تنظیم شدن را به سیستم فازی اضافه کنیم، سیستم فازی - عصبی بدست می‌آید. در این سیستم‌ها همه پارامترهای متعلق به قوانین فازی را می‌توان با استفاده از خاصیت یادگیری شبکه‌های عصبی در هر تکرار تنظیم نمود. با این کار دیگر نگران چگونگی تشکیل قوانین و بازه تغییرات توابع عضویت و همچنین ضرایب خروجی نخواهیم بود. یعنی در هر لحظه این پارامترها تنظیم شده و به مقدار بهینه خود می‌رسد. روش پیشنهادی در اینجا استفاده از زوج‌های ورودی - خروجی سیستم به منظور تولید قوانین و توابع عضویت‌ها استفاده کرد. سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی ANFIS می‌توان پارامترهای کنترل کننده فازی را تنظیم کند ANFIS شبکه تطبیق پذیر و قابل آموزشی است که به لحاظ عملکرد کاملاً مشابه سیستم استنتاج فازی است [۱۱]. ANFIS از الگوریتم هیبریدی برای بدست آوردن پارامترهای تابع عضویت استفاده می‌کند. روش هیبریدی در واقع از روش الگوریتم پس انتشار خطا و مربع حداقل برای آموزش سیستم استنتاج فازی استفاده می‌کند. ساختار معادل ANFIS به صورت گراف شکل (۶) خواهد بود. همان طور که در شکل مشاهده می‌گردد این شبکه دارای پنج لایه می‌باشد. در ادامه به اختصار پنج لایه مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۰].

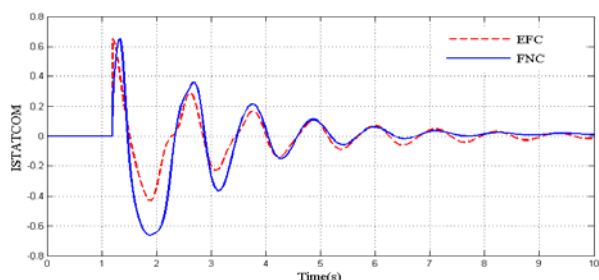
لایه اول: این لایه مربوط به توابع عضویت می‌باشد.

لایه دوم: این لایه مربوط به تشکیل قوانین فازی می‌باشد.

لایه سوم: لایه نرمالیزاسیون می‌باشد.



شکل ۱۰- نمودار صفحه فاز سیستم



شکل ۱۱- جریان STATCOM

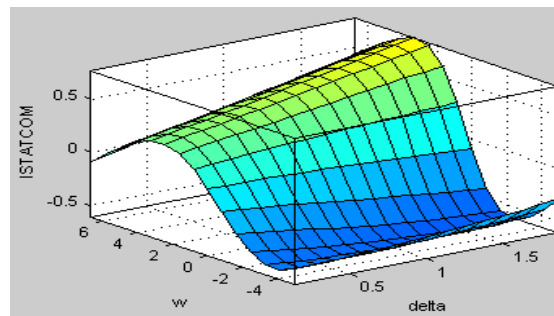
جدول (۱) مقدار زمان بحرانی رفع خطا به در سه حالت بدون جبران کننده و با کنترل تابع انرژی و با کنترل کننده FNC نشان داده شده است. با مقایسه این سه زمان کارایی کنترل کننده FNC در بهبود پایداری گذرای سیستم مشهود می گردد.

جدول ۱- زمان بحرانی رفع خطا با وجود کنترل کننده

| کنترل کننده         | بدون جبران ساز | EFC   | NFC   |
|---------------------|----------------|-------|-------|
| زمان بحرانی (ثانیه) | ۰/۱۹۵          | ۰/۲۰۵ | ۰/۲۰۹ |

## ۵- نتیجه گیری

طراحی کنترل کننده برای جبران کننده سنکرون با استفاده معیار تابع لیاپانوف توانست مقدار تابع انرژی سیستم بعد از اختلال سه فاز کاهش و منجر به پایداری گذرا سیستم شود. با طراحی کنترل کننده FNC با استفاده از ابزار ANFIS قوانین فازی حاکم بر کنترل کننده به صورت خود تنظیم به وجود آمدند. سیستم فازی بدست آمده، ضمن اینکه دارای ویژگی مقاوم در برخورد با نامعینی سیستم است، معیار پایداری لیاپانوف نیز برآورده می کند. کنترل کننده پیشنهادی در نهایت باعث میرا شدن نوسانات سیستم و افزایش زمان بحرانی رفع خطا گردید.



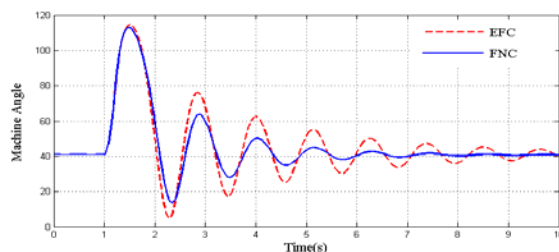
شکل ۷- منحنی سطح برای کنترل کننده فازی آموزش دیده توسط

شبکه عصبی

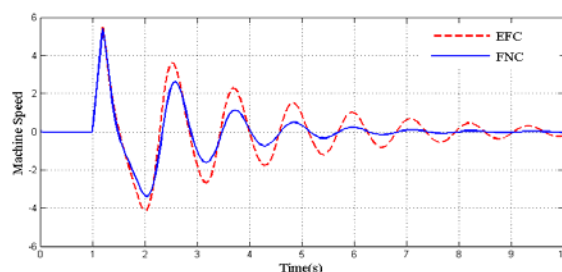
## ۶- شبیه سازی

در ادامه تأثیر کنترل کننده FNC در مقایسه با کنترل کننده EFC در بهبود پایداری گذرا، برای یک شبکه SMIB با مشخصات [۶] بررسی می شود. جبران کننده سنکرون استاتیکی در وسط خط انتقال قرار گرفته است اتصال کوتاهی در زمان  $t = 1$  بر روی باس ژنراتور اعمال می گردد و بعد از مدت ۲۰۰ میلی ثانیه پاک زدایی می گردد. با انجام شبیه سازی نمودار زاویه داخلی ژنراتور و تغییرات سرعت و جریان STATCOM و نمودار صفحه فاز سیستم برای هر دو نوع کنترل کننده به ترتیب در شکل های (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) است.

نتایج بدست آمده از شبیه سازی نشان می دهد کنترل کننده FNC پیشنهادی در مقایسه با کنترل EFC توانسته میرایی نوسانات سیستم بعد از اتصال کوتاه سه فاز افزایش دهد.



شکل ۸- زاویه داخلی ژنراتور



شکل ۹- تغییرات سرعت ژنراتور

## ۶-مراجع

- [1] L. Gyugyi and N. G. Hingorani; **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**, IEEE press, New York, 1999.
- [2] H.F. Wang; **“Interactions and Multivariable Design of STATCOM AC and DC Voltage Control”**, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 25, pp 387-394.
- [3] S.Abazari., M. Ehsan, M.R. Zolghadr; **“Rule Base Advanced Static Var Compensator Control Scheme for Transient Stability”**, Scintica Iranica, Vol.13 No.4, pp327-336, October 2006.
- [4] M.R. Zolghadri, A. Ghafori, M. Ehsan; **“Power System Transient Stability Improvement Using Fuzzy Controlled STATCOM”**, Chongqing, China, October 22-26, 2006
- [5] V.K. Chandrakar, A.G. Kothar; **“Ann-based Static Synchronous Compensator for Improving Transient Stability Performance”**, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 28, No. 2, 2008
- [6] M.H. Haque; **“Use of Energy Function to Evaluate theadditional Damping Provided by a STATCOM”**, Electric Power Systems Research, Vol. 72, pp. 195-202, 2004.
- [7] M. H. Haque; **“Improvement of First Swing Stability Limit by Utilizing Full Benefit of Shunt FACTS Devices”**, IEEE transactions on power systems, Vol. 19, No. 4, November 2004
- [8] P. Kundur; **“Power System Stability and Control”**, McGraw, New York, 1994.
- [9] Sen, K; **“Statcom-Static Synchronous Compensator: Theory, Modeling and Applications”**, IEEE Power Engineering Society,pp. 1177- 1183, 1999.
- [10] Rene Jager; **“ Fuzzy Logic in Control , PHD Thesis”**, elektrotechnisch ingenieur, geborent Amsterdam 1995
- [11] Jan Jantzn; **“Tutorial On Fuzzy Logic”**,Tech.report No. 98-E868, Technical University of Denmark, Department of Automation, Aug 1998.