

# طراحی و شبیه‌سازی کنترل کننده ANFIS همراه با کنترل کننده فازی به منظور کنترل توان اکتیو انتقالی توسط TCSC

عباس کارگر و محسن حسین‌زاده سورشجانی

زیر سنکرون (SSR)<sup>۴</sup> و افزایش قابلیت اطمینان سیستم به‌عنوان رایج‌ترین ادوات FACTS در کنترل توان انتقالی محسوب می‌شود [۱] و [۲].

ابتدا مشخصه TCSC در حالت ماندگار و فرکانس‌های پایین در [۳] و [۴] مطرح گردید. همچنین در [۵] تا [۷] پایداری سیستم در صورت وجود TCSC، طراحی کنترل‌کننده‌های مختلف و مدل‌های جدیدتر TCSC در فرکانس‌های بالاتر مطرح گردید. همچنین در [۸] به کمک تجزیه و تحلیل TCSC به مدل‌های خطی و فضای حالت مربوط به آن با دقت بسیار بالایی دست یافته است. این مدل‌ها از دقت بالایی برخوردار است و برای اغلب کاربردها از جمله طراحی کنترل‌کننده‌های TCSC و بررسی مسئله پایداری قابل استفاده هستند. در [۹] تا [۱۳] به طراحی و مطالعه انواع مختلف کنترل‌کننده‌های غیر خطی TCSC به‌منظور بهبود پایداری در سیستم‌های قدرت پرداخته شد. در [۱۴] به کنترل ولتاژ بار موجود در سیستم در حضور TCSC توسط کنترل‌کننده‌های PID<sup>۵</sup> و فازی پرداخته شد و تأثیر این کنترل‌کننده‌ها بر روی اعوجاج کلی هارمونیک (THD) ولتاژ مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه‌سازی نوسانات ولتاژ بار در صورت استفاده از کنترل‌کننده فازی به‌صورت قابل توجهی کاهش یافت همچنین کنترل‌کننده فازی با وجود عکس‌العمل سریع‌تر در کنترل ولتاژ بار، بالادگی کمتری نسبت به کنترل‌کننده PID داشت. همچنین [۱۵] تا [۱۶] به طراحی و بررسی کنترل‌کننده‌های فازی مختلف به‌منظور بهبود پایداری با میرا کردن نوسانات توان انتقالی پرداختند. مرجع [۱۵] به طراحی کنترل فازی بر اساس مدل T-S (تاگای-سوگینو)<sup>۶</sup> پرداخته و تأثیر آن را بر روی خطای تک‌فاز و سه‌فاز مورد بررسی قرار داده است. مرجع [۱۶] به ارائه کنترل‌کننده PI فازی خودتنظیم‌شونده<sup>۷</sup> (STFPI) با قوانین کاهش‌یافته پرداخته، به‌نحوی که تعداد کل قوانین تقریباً ۸۰٪ کاهش یافته است. نتایج به‌دست آمده حاکی از دقت مناسب کنترل‌کننده فازی با قوانین کاهش‌یافته می‌باشد. مرجع [۱۷] به طراحی کنترل‌کننده فازی برای کنترل توان اکتیو برای چند TCSC پرداخت.

در این مقاله ابتدا نحوه تأثیرگذاری TCSC بر روی کنترل توان اکتیو انتقالی به اجمال بیان شده و سپس از کنترل‌کننده PID برای کنترل زاویه آتش TCSC به‌کار رفته در سیستم دوماشینه (سیستم بر گرفته از [۱۸]) به‌منظور دستیابی به توان اکتیو انتقالی مورد نظر استفاده شده است. یک کنترل‌کننده فازی نیز با کمترین توابع عضویت و قوانین پایه‌ای پیشنهاد شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، این دو نوع کنترل‌کننده با یکدیگر مقایسه شده است.

چکیده: کنترل توان اکتیو عبوری از خطوط انتقال به‌خصوص در شرایط تراکم یا وقوع خطا یکی از مهم‌ترین مسایل پیش رو در کنترل و مدیریت صحیح سیستم‌های قدرت است. در این شرایط برای کنترل پیوسته و به‌خصوص افزایش توان انتقالی، عمدتاً از خازن سری کنترل‌شونده با تریستور (TCSC) استفاده می‌شود که در واقع به‌علت قابلیت سریع کنترل تریستورها و توانایی در پایداری نگاه‌داشتن سیستم حین بروز خطاهای متفاوت می‌باشد. در این مقاله به کنترل توان اکتیو انتقالی در محدوده تقریباً ۱۰ مگاواتی به کمک TCSC پرداخته شده است. برای کنترل زاویه آتش TCSC از کنترل‌کننده‌های مختلف اعم از کنترل‌کننده PID، فازی و ANFIS استفاده شده و با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مزایا و معایب هر یک از این کنترل‌کننده‌ها بررسی شده است. کنترل‌کننده ANFIS نیز به‌صورت حلقه‌باز پیاده‌سازی شده و دارای پاسخ‌گذاری بسیار مناسبی است. عیب این نوع پیاده‌سازی خطای حالت ماندگار آن بوده و نسبت به تغییر پارامترها نیز بسیار حساس می‌باشد. لذا برای رفع این مشکلات می‌توان آن را با کنترل‌کننده فازی طراحی‌شده ترکیب کرد و در عین سادگی، عملکرد بسیار مناسبی از مجموعه به‌دست آورد.

کلید واژه: کنترل توان انتقالی، کنترل‌کننده فازی، ANFIS، TCSC.

## ۱- مقدمه

با استفاده از سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر<sup>۱</sup> (FACTS) می‌توان بدون احداث خطوط جدید از ظرفیت واقعی و موجود سیستم‌های انتقال بهره‌لازم را برد و به کمک این ادوات می‌توان به کنترل توان و افزایش ظرفیت قابل بهره‌برداری در سیستم نیز دست یافت. اولین بار مفهوم استفاده از سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر در سال ۱۹۸۸ توسط نارین هینگورانی<sup>۲</sup> به‌منظور افزایش توان انتقالی در خطوط انتقال AC با تلفیق کنترل‌کننده‌های الکترونیک قدرت مطرح شد. با استفاده از این روش امکان دستیابی به تنظیم ولتاژ بهتر و قابلیت اطمینان مناسب‌تر بدون اضافه‌کردن خطوط جدید یا تغییر ساختار شبکه ایجاد گردیده است [۱]. در واقع خازن سری کنترل‌شونده با تریستور<sup>۳</sup> (TCSC) به‌علت مزایایی از جمله بهبود پایداری دینامیکی و میراسازی نوسانات توان، بهبود پایداری گذرا از طریق کنترل راکتانس خط، کاهش یا حذف پدیده تشدید نوسانات

این مقاله در تاریخ ۸ تیر ماه ۱۳۹۰ دریافت و در تاریخ ۲۱ دی ماه ۱۳۹۰ بازنگری شد.

عباس کارگر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد  
(email: kargar@ieee.org)

محسن حسین‌زاده سورشجانی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد  
(email: Hosseinzadeh.ieee@yahoo.com)

4. Sub-Synchronous Resonance

5. Proportional Integral Derivative Controllers

6. Total Harmonic Distortion

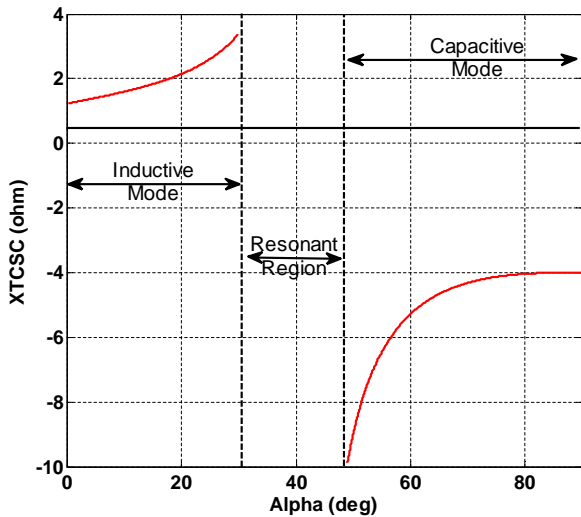
7. Takagi-Sugeno

8. Self-Tuning Fuzzy PI Controller

1. Flexible AC Transmission Systems

2. Narian Hingorani

3. Thyristor Controlled Series Capacitance



شکل ۲: نمودار تغییرات راکتانس TCSC طراحی شده بر حسب زاویه آتش  $\alpha$ .

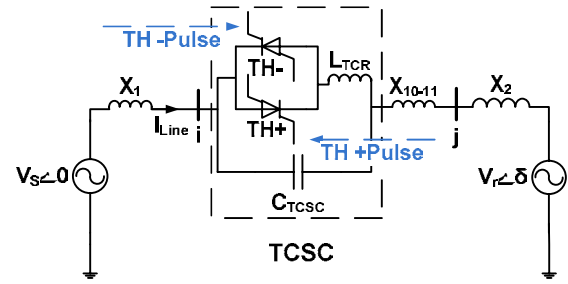
که در  $\alpha$  (۳) زاویه آتش TCR می‌باشد و از ۰ تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند. پالس‌های آتش سنکرون شده با جریان خط تولید می‌شوند. به کمک روابط مطرح شده و با توجه به مقادیر مورد استفاده در پیوست، نمودار تغییرات راکتانس TCSC مورد استفاده بر حسب زاویه آتش مطابق شکل ۲ خواهد بود.

البته در [۱] و [۲] نیز به بررسی جزئیات مربوط به راکتانس TCSC در نواحی مختلف پرداخته شده است. از محدودکننده نیز به منظور جلوگیری از ورود به ناحیه رزونانس استفاده شده است و از آنجا که از ناحیه سلفی نیز استفاده نشده، محدودکننده زاویه آتش را در محدوده ۳۹ تا ۹۰ درجه نگه می‌دارد تا TCSC صرفاً در ناحیه خازنی به کار گرفته شود. بنابراین مقادیر سلف و خازن TCSC در جدول پ-۲ طوری انتخاب شده‌اند تا کنترل پیوسته توان انتقالی تقریباً در محدوده ۱۰ مگاواتی در ناحیه خازنی امکان‌پذیر گردد.

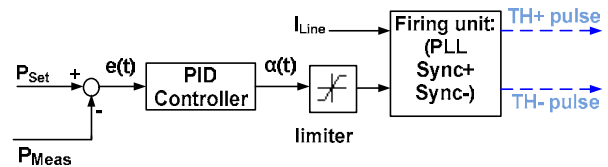
### ۳- کنترل کننده PID

از آنجا که می‌خواهیم توان اکتیو انتقالی اندازه‌گیری شده  $P_{Meas}$ ، توان مرجع  $P_{Set}$  را دنبال کند، اختلاف این دو یعنی سیگنال خطای مربوطه به کنترل کننده PID داده شده و با تنظیم مناسب پارامترهای مربوطه عملکرد مناسبی از این کنترل کننده انتظار می‌رود. ولی نمودار شکل ۲ نشان‌دهنده غیر خطی بودن مشخصه TCSC نسبت به زاویه آتش  $\alpha$  می‌باشد، لذا عملکرد کنترل کننده PID فقط در حوالی نقطه کاری که تنظیم شده بهینه خواهد بود و کوچک‌ترین تغییر در نقطه کار مانع از عملکرد بهینه کنترل کننده خواهد شد. برای رفع این نقیصه، پیشنهاد استفاده از بهره برنامه‌ریزی شده برای نقاط کاری مختلف، مطرح است، اما در این صورت نیز نحوه تنظیم صحیح پارامترها کمی مشکل بوده که با استفاده از الگوریتم ژنتیک به درستی قابل انجام است. در این صورت باز هم کنترل کننده نسبت به تغییر پارامترهای سیستم حساس بوده و در صورت تغییر اندکی در پارامترها ناشی از عوامل مختلف، اعم از تغییرات پارامترهای سیستم در اثر مرور زمان، نه تنها عملکرد کنترل کننده به صورت بهینه نخواهد بود، بلکه ممکن است حتی موجب بروز ناپایداری و یا رفتار نوسانی در سیستم شود. در شکل ۳ نحوه پیاده‌سازی این کنترل کننده برای تولید پالس‌های تریستور (سنکرون شده با جریان خط) نشان داده شده است.

در اینجا همانند [۱۴] برای تنظیم ضرایب PID از روش زیگلر-



شکل ۱: شماتیک تک خط سیستم مورد آزمایش.



شکل ۳: ساختار کلی کنترل کننده PID برای کنترل توان اکتیو انتقالی.

همچنین به کمک داده‌های به دست آمده از عملکرد سیستم بدون کنترل کننده به طراحی کنترل کننده سیستم‌های استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS) پرداخته شده است. این کنترل کننده قادر به عمل کردن به صورت حلقه باز بدون نیاز به اندازه‌گیری توان اکتیو انتقالی بوده و دارای عملکرد گزافی بسیار مناسبی است. این کنترل کننده از طرفی در بعضی از موارد دارای خطای حالت دائم بوده و به پارامترهای سیستم بسیار وابسته است. لذا برای برطرف نمودن این مشکلات از ترکیب این کنترل کننده با کنترل کننده فازی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب کنترل کننده می‌باشد. کنترل کننده‌های طراحی شده حتی با وجود نامعینی‌های پارامترهای سیستم نیز عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهند.

### ۲- نحوه تأثیر TCSC بر توان انتقالی

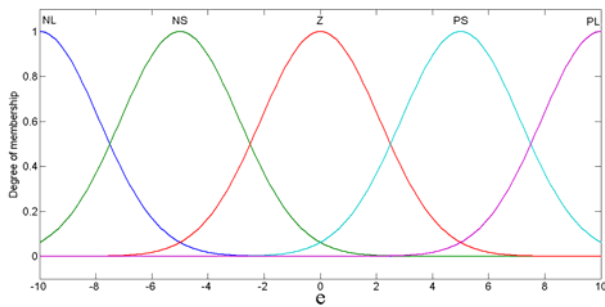
شکل ۱ سیستم تحت مطالعه را نشان می‌دهد که  $(V_s, jX_1)$  و  $(V_r, jX_2)$  به ترتیب معادل تونن شین‌های ۱۰ و ۱۱ و همچنین  $X_{1-11}$  نیز راکتانس خط واسط بین دو شین ۱۰ و ۱۱ مربوط به سیستم ارائه شده در [۱۸] می‌باشد. پارامترهای مورد استفاده در شکل ۱ در پیوست آورده شده است. در این شکل به منظور سادگی بیشتر از نشان دادن مقاومت‌های  $R_{G_s}$  و  $R_{G_r}$  که نمایانگر تلفات هر بخش از سیستم می‌باشد، صرف نظر شده است. در چنین سیستمی توان انتقالی از (۱) به دست می‌آید

$$P = \frac{V_s V_r}{X} \sin \delta \quad (1)$$

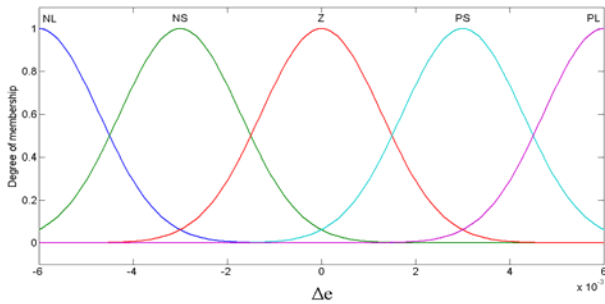
که در (۱) راکتانس  $X$ ، راکتانس مؤثر سیستم است خود مجموع کلیه راکتانس‌های موجود اعم از راکتانس خطوط و راکتانس مؤثر جبران‌ساز TCSC می‌باشد. بنابراین با کنترل زاویه آتش تریستورها  $(\alpha)$ ، راکتانس مؤثر TCSC به صورت پیوسته تغییر کرده و طبق (۱) توان اکتیو انتقالی قابل کنترل خواهد بود [۲]. مقدار راکتانس TCSC بر حسب زاویه آتش از (۲) به دست می‌آید

$$X_{TCSC} = \frac{X_C \times X_{TCR}(\alpha)}{X_{TCR}(\alpha) - X_C} \quad (2)$$

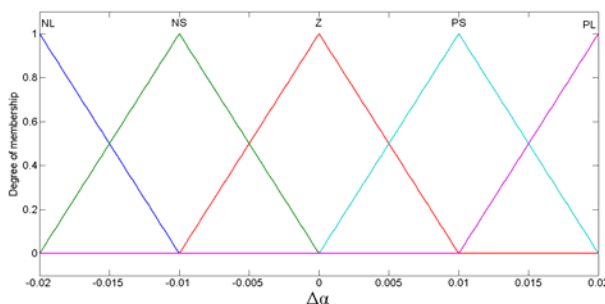
$$X_{TCR}(\alpha) = \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha} \quad (3)$$



شکل ۵: خطای توان انتقالی به عنوان تابع عضویت ورودی، در طراحی کنترل کننده فازی.



شکل ۶: تغییرات خطای توان انتقالی به عنوان تابع عضویت ورودی، در طراحی کنترل کننده فازی.



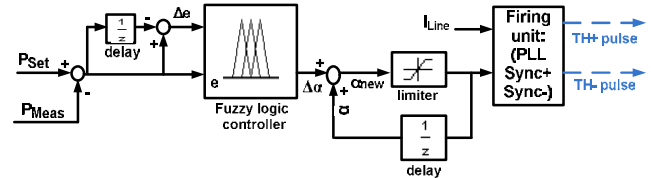
شکل ۷: تابع عضویت خروجی تغییرات زاویه آتش α در طراحی کنترل کننده فازی.

در طراحی این کنترل کننده برای سادگی بیشتر فقط از ۵ تابع عضویت گوسی یکنواخت برای توابع عضویت ورودی و از ۵ تابع عضویت مثلثی یکنواخت برای توابع عضویت خروجی استفاده شده است. شکل های ۵ تا ۷ نشان دهنده توابع عضویت مربوطه می باشند. همچنین فقط از ۹ قانون کنترلی پایه برای کنترل کننده استفاده شده که این قوانین در جدول ۱ آورده شده اند.

### ۵- کنترل کننده ANFIS

مشکلات مربوط به پیاده سازی کنترل کننده های فازی از جمله نبودن روشی استاندارد برای تبدیل دانش انسانی یا نتایج آزمایشات به قواعد فازی و همچنین مشکل تنظیم مؤثر و مناسب پارامترهای توابع عضویت، سبب مطرح شدن کنترل کننده ANFIS گردید [۱۹]. از طرفی ANFIS در مقایسه با ساختارهای مختلف عصبی از دقت و سرعت همگرایی بالاتری نیز برخوردار می باشد.

لذا برای طراحی کنترل کننده ANFIS ابتدا زاویه آتش های مختلفی تحت عنوان ورودی در محدوده مجاز به واحد تولید پالس های آتش داده شده و با اندازه گیری و ثبت توان اکتیو انتقالی، داده های مورد نظر برای آموزش به دست می آیند. در این مرحله اطلاعات مربوط به مدل به دست آمده و برای طراحی کنترل کننده کفایت از معکوس مدل به دست آمده



شکل ۴: روش مورد استفاده در طراحی و پیاده سازی کنترل کننده فازی برای کنترل توان اکتیو انتقالی.

جدول ۱: قوانین به کار رفته در طراحی کنترل کننده فازی.

Rule N.	e	Δe	Δα
۱	Z	Z	Z
۲	PS	Z	NS
۳	PL	Z	NL
۴	NS	Z	PS
۵	NL	Z	PL
۶	Z	NL	PL
۷	Z	NS	PS
۸	Z	PL	NL
۹	Z	PS	NS

نیکولز<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این روش ابتدا ضرایب بهره انتگرال گیر و مشتق گیر برابر صفر در نظر گرفته شده و بهره تناسبی آن قدر افزایش داده می شود که سیستم نوسانی شود. این بهره به عنوان Ku و دوره تناوب نوسانات به عنوان Pu انتخاب شده و ضرایب PID طبق (۴) به دست می آیند

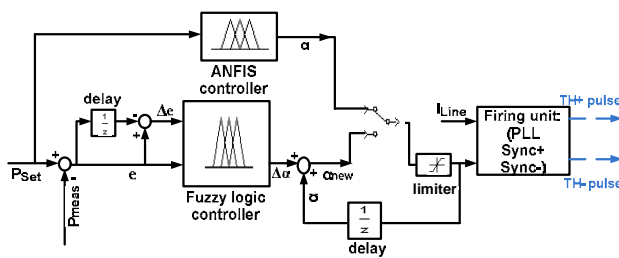
$$\begin{cases} Kp = \frac{3}{5} Ku \\ Ki = \frac{6 \times Ku}{5 \times Pu} \\ Kd = \frac{3 \times Ku \times Pu}{40} \end{cases} \quad (4)$$

ضرایب به دست آمده از این روش ضرایب نهایی تنظیم شده برای نقطه کار مورد نظر نمی باشند ولی می توان از آنها به عنوان نقطه شروع تنظیم مناسب استفاده کرد و متناسب با پاسخ دلخواه در نقاط کار مختلف ضرایب را تنظیم نمود.

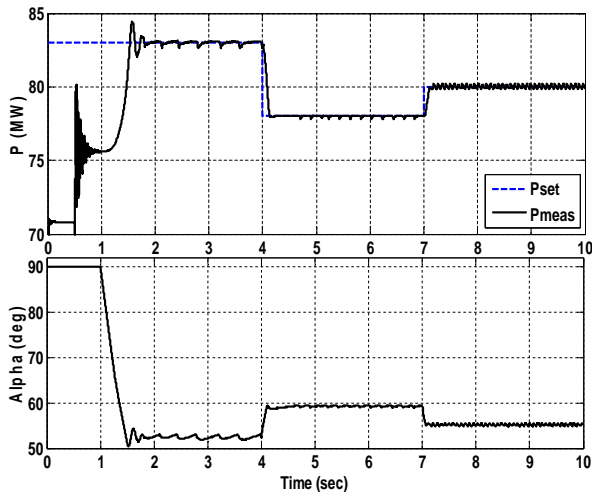
### ۴- کنترل کننده فازی

وجود مشکلات مطرح شده مربوط به کنترل کننده PID اعم از وابستگی شدید به نقطه کار و حساسیت زیاد نسبت به تغییر پارامترها و همچنین مشکل وجود بلوک مشتق گیر در این کنترل کننده، سبب می شود که کنترل کننده های نرم از جمله کنترل کننده فازی مورد توجه واقع شوند. شکل ۴ ساختار کلی روش مورد استفاده در طراحی کنترل کننده فازی را نشان می دهد. سیگنال خطای e و ورودی های کنترل کننده می باشند و مادامی که هر یک از این دو ورودی مخالف صفر باشند، خروجی کنترل کننده فازی مخالف صفر بوده، لذا تا موقعی که سیستم در حالت مطلوب قرار گیرد، یعنی سیگنال های خطا و تغییرات خطا صفر شوند، زاویه آتش تغییر خواهد کرد. در این صورت خروجی کنترل کننده صفر خواهد بود و زاویه آتش همان مقدار مناسب قبلی خواهد ماند.

1. Ziegler-Nichols



شکل ۹: روش مورد استفاده در طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده ترکیبی فازی ANFIS برای کنترل توان اکتیو انتقالی.

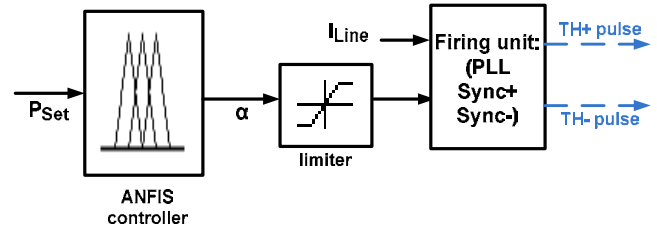


شکل ۱۱: توان اکتیو انتقالی و زاویه آتش  $\alpha$  در صورت عملکرد کنترل‌کننده فازی.

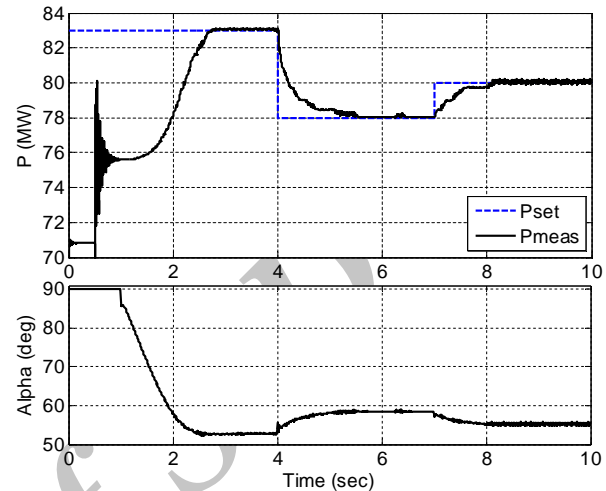
استفاده شده است. به این صورت که در لحظات اول کنترل‌کننده ANFIS عمل می‌کند و سپس برای حذف خطای حالت ماندگار از کنترل‌کننده فازی استفاده می‌شود. شکل ۹ نحوه پیاده‌سازی این کنترل‌کننده را نمایش می‌دهد. البته فرمان این که کدام یک از کنترل‌کننده‌ها تعیین‌کننده زاویه آتش باشد را می‌توان از روی میزان خطا و یا تنظیم زمان تعیین نمود.

## ۷- شبیه‌سازی و مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ها

به‌منظور بررسی رفتار کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده، تأثیر آنها در کنترل زاویه آتش TCSC مورد استفاده در سیستم شکل ۱ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌منظور حذف تأثیر گذرای ابتدای شبیه‌سازی بر کنترل‌کننده‌ها، در ۰/۵ ثانیه اول TCSC در مدار قرار ندارد و لذا هیچ جبران‌سازی در سیستم صورت نگرفته است. همچنین برای حذف تأثیر گذرای کلیدزنی خازن TCSC بر کنترل‌کننده، از ۰/۵ تا ۱ ثانیه زاویه آتش برابر ۹۰ درجه قرار داده می‌شود. در این مدت به‌دلیل این که هیچ پالسی تولید نمی‌شود، فقط خازن TCSC وارد مدار شده و نوسانات توان به‌خاطر کلیدزنی خازن است. با این حال در این مدت، شبکه هنوز به هیچ هارمونیک آلوده نشده است. از آنجا که در این زاویه آتش کمترین مقدار خازنی TCSC وارد مدار شده است، از این به بعد می‌توان از کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده جهت افزایش توان انتقالی در سیستم استفاده نمود. در اینجا از لحظه ۱ ثانیه کنترل‌کننده‌ها وارد عمل می‌شوند. به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات مداوم شرایط بهره‌برداری، کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده در توان‌های مرجع مختلف ۸۳، ۷۸ و ۸۰ مگاوات، زاویه آتش TCSC را تعیین خواهند کرد. در این حالات عملکرد TCSC در شرایط مختلف (افزایش و کاهش توان انتقالی) مورد بررسی واقع شده است. شکل ۱۰ عملکرد کنترل‌کننده PID



شکل ۸: روش مورد استفاده در طراحی و پیاده‌سازی حلقه‌باز کنترل‌کننده ANFIS برای کنترل توان اکتیو انتقالی.



شکل ۱۰: توان اکتیو انتقالی و زاویه آتش  $\alpha$  در صورت عملکرد کنترل‌کننده PID.

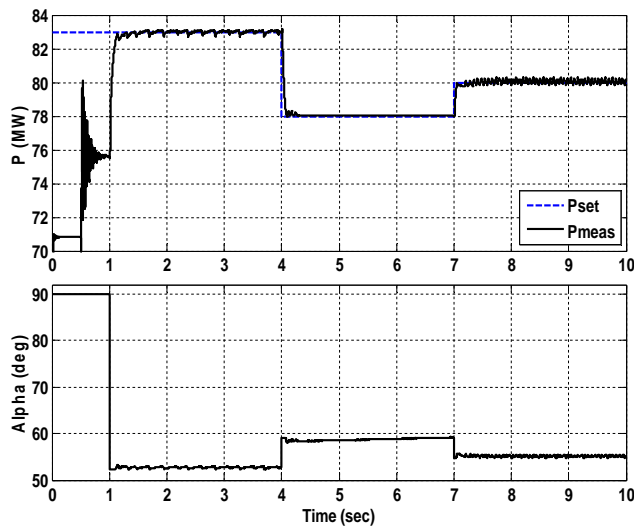
در ساختن ANFIS استفاده کرد. به این صورت که خروجی، زاویه آتش و ورودی توان مرجع انتخاب می‌شود. بنابراین کنترل‌کننده ANFIS به‌دست آمده برای عملکرد به اندازه‌گیری هیچ کمیتی حتی توان اکتیو انتقالی نیاز نداشته و به‌صورت حلقه‌باز قابلیت پیاده‌سازی دارد. شکل ۸ نحوه پیاده‌سازی این کنترل‌کننده را نشان می‌دهد.

البته این کنترل‌کننده به دلیل این که به‌صورت حلقه‌باز پیاده‌سازی می‌شود، مشکلات مربوط به کنترل حلقه‌باز (اعم از احتمال وجود خطای حالت ماندگار) را دارد، ولی در مقایسه با کنترل حلقه‌باز طراحی‌شده از طریق (۱) دارای مزایای زیادی است. از جمله این که دیگر نیازی به نمونه‌برداری لحظه به لحظه اندازه و زاویه ولتاژ نداشته و در صورت بروز نامعینی پارامترها، با توجه به این که کنترل‌کننده از قبل تحت آموزش قرار گرفته، مشکلی ایجاد نخواهد شد.

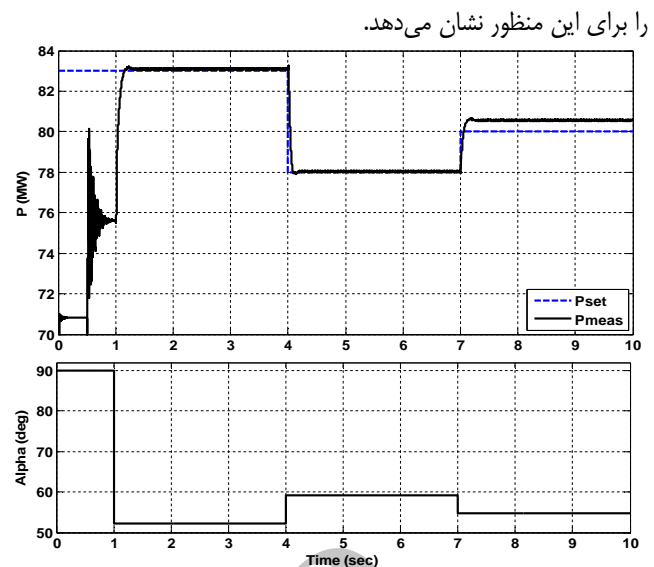
## ۶- ترکیب کنترل‌کننده ANFIS و فازی

هرچند می‌توان از آموزش داده‌هایی با تعداد ورودی و خروجی بیشتر و حتی به‌صورت online در آموزش ANFIS استفاده نمود، اما جهت طراحی کنترل‌کننده مقاوم نسبت به تغییر پارامترها با کمترین داده‌ها، بدون نیاز به آموزش online و بهترین پاسخ (اعم از پاسخ گذرا و پاسخ حالت ماندگار) پیشنهاد می‌شود که از ترکیب کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده استفاده شود.

در صورت ترکیب کنترل‌کننده ANFIS با کنترل‌کننده PID، تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID (به‌علت این که کنترل‌کننده PID فقط جهت حذف خطای حالت دائم به‌کار گرفته می‌شود) بسیار ساده‌تر بوده و همچنین مشکلات مطرح‌شده برای کنترل‌کننده PID را هم نخواهد داشت. اما به علت عملکرد مناسب‌تر کنترل‌کننده فازی، اعم از خاصیت مقاوم‌بودن آن، در این مقاله فقط از ترکیب کنترل‌کننده فازی و ANFIS



شکل ۱۳: توان اکتیو انتقالی و زاویه آتش  $\alpha$  در صورت عملکرد کنترل کننده ترکیبی فازی-ANFIS.



شکل ۱۴: توان اکتیو انتقالی و زاویه آتش  $\alpha$  در صورت عملکرد کنترل کننده ANFIS به صورت حلقه باز.

جدول ۲: اطلاعات به دست آمده از پاسخ کنترل کننده های طراحی شده مربوط به سیگنال مرجع  $P_{Set} = 83$  (MW).

کنترل کننده	فراجهش (مگاوات)	زمان بالازدگی (ثانیه)	زمان نشست (ثانیه)	خطای حالت ماندگار (مگاوات)	نوسانات حالت ماندگار (مگاوات)
PID	۰	۱٫۷	۱٫۷	۰٫۱	۰٫۰۸
فازی	۱٫۴۵	۰٫۵۲	۰٫۸	۰	۰٫۴۸
ANFIS	۰٫۱	۰٫۱۳۲	۰٫۳۵	۰٫۰۷۵	۰٫۰۶۵
فازی-ANFIS	۰٫۱	۰٫۱۳۲	۰٫۵	۰	۰٫۳۵

جدول ۳: اطلاعات به دست آمده از پاسخ کنترل کننده های طراحی شده مربوط به سیگنال مرجع  $P_{Set} = 78$  (MW).

کنترل کننده	فراجهش (مگاوات)	زمان بالازدگی (ثانیه)	زمان نشست (ثانیه)	خطای حالت ماندگار (مگاوات)	نوسانات حالت ماندگار (مگاوات)
PID	۰	۱٫۷	۲٫۴	۰٫۰۲۵	۰٫۰۵
فازی	۰٫۰۸	۰٫۱۲۶	۰٫۲۵	۰	۰٫۲۵
ANFIS	۰٫۶۵	۰٫۰۷۵	۰٫۲	۰٫۰۲۵	۰٫۰۵
فازی-ANFIS	۰٫۰۵	۰٫۰۷۵	۰٫۳	۰	۰٫۳

جدول ۴: اطلاعات به دست آمده از پاسخ کنترل کننده های طراحی شده مربوط به سیگنال مرجع  $P_{Set} = 80$  (MW).

کنترل کننده	فراجهش (مگاوات)	زمان بالازدگی (ثانیه)	زمان نشست (ثانیه)	خطای حالت ماندگار (مگاوات)	نوسانات حالت ماندگار (مگاوات)
PID	۰	۰٫۵۵	۱	۰	۰٫۳
فازی	۰	۰٫۰۹۸	۰٫۲	۰	۰٫۴۲
ANFIS	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۲۵	۰٫۵۵	۰٫۰۶
فازی-ANFIS	۰	۰٫۰۵	۰٫۳	۰	۰٫۴

نتایج مربوط به کنترل کننده فازی نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. کنترل کننده فازی زاویه آتش را به صورت پیوسته تغییر داده و قادر است نسبت به کنترل کننده PID با سرعت بیشتری توان مرجع را دنبال نماید. البته به دلیل این که شبکه به خاطر وجود TCSC به هارمونیک آلوده می شود، حتی با یک مقدار خاص از زاویه آتش توان اکتیو نوسانی می شود (هرچند ممکن است مقدار این نوسان کم باشد). همچنین به دلیل تأخیر ذاتی ناچیز موجود در TCSC و ویژگی های غیر خطی آن، کنترل کننده در حالت ماندگار دارای رفتاری نوسانی است.

نتایج حاصل از شبیه سازی مربوط به کنترل کننده ANFIS در شکل ۱۲ نشان دهنده پاسخ گذاری بسیار مناسب این کنترل کننده می باشد. نتایج به دست آمده از شبیه سازی نشان می دهد که این کنترل کننده در بسیاری از موارد (به ازای توان های مرجع متفاوت) حتی قادر به صفر کردن

خطای حالت ماندگار می باشد. از آنجا که کنترل کننده حلقه باز است، در صورت تغییر پارامترهای سیستم نسبت به حالت مورد استفاده در آموزش، ممکن است دچار خطای حالت ماندگار گردد (همان طور که در حالت  $P_{Set} = 80$  MW نیز رخ داده است). البته از آنجا که بروز تغییر در پارامترهای سیستم امری امکان پذیر است، مقدار و احتمال رخداد خطا بر اثر مرور زمان نیز افزایش می یابد. بنابراین به دلیل عدم مقاوم بودن کنترل کننده ANFIS نسبت به تغییر پارامترها (در صورت آموزش offline) سبب بروز خطا در حالت ماندگار می گردد.

جهت حذف نقایص مطرح شده مربوط به کنترل کننده حلقه باز ANFIS طراحی شده و بهره گیری از مزایای این کنترل کننده و کنترل کننده فازی، از ترکیب کنترل کننده فازی و ANFIS به منظور کنترل توان انتقالی استفاده شده است. شکل ۱۳ مربوط به این کنترل کننده ترکیبی،

ترتیب در جداول پ-۱ و پ-۲ مربوط به پیوست آورده شده است. جدول پ-۳ ضرایب کنترل‌کننده PID را نشان می‌دهد. جدول پ-۴: پارامترهای TCSC.

پارامتر	مقدار
$L_{TCR}$ (mH)	۲٫۵
$C_{TCSC}$ ( $\mu$ F)	۶۶۳
$C_{Sub}$ (nF)	۵۰
$R_{Sub}$ (k $\Omega$ )	۵

جدول پ-۳: ضرایب کنترل‌کننده PID.

ضریب	مقدار
$K_P$	۰٫۴
$K_I$	۴٫۶
$K_D$	۰٫۰۲۳

## مراجع

- [1] K. R. Padiyar, *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*, Tunbridge Wells: Anshan, 2009.
- [2] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999.
- [3] S. G. Jalali, R. A. Hedin, M. Pereira, and K. Sadek, "A stability model for the advanced series compensator (ASC)," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 1128-1137, Apr. 1996.
- [4] C. R. Fuerte - Esquivel, E. Acha, and H. Ambriz - Perez, "A thyristor controlled series compensator model for the power flow solution of practical power networks," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 58-64, Feb. 2000.
- [5] S. G. Jalali, R. H. Lasseter, and I. Dobson, "Dynamic response of a thyristor controlled switched capacitor," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 9, no. 3, pp. 1609-1615, Jul. 1994.
- [6] A. Ghosh and G. Ledwich, "Modelling and control of thyristor-controlled series compensators," in *IEE Proc. Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 142, no. 3, pp. 297-304, May 1995.
- [7] P. Mattavelli, G. C. Verghese, and A. M. Stankovic, "Phasor dynamics of thyristor controlled series capacitor systems," *IEEE Trans. Power System*, vol. 12, no. 2, pp. 1259-1267, Aug. 1997.
- [8] D. Jovicic and G. N. Pillai, "Analytical modeling of TCSC dynamics," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1097-1104, Apr. 2005.
- [9] A. M. Stankovic, P. Mattavelli, and R. Ortega, "On the nonlinear control of TCSC," in *Proc. of the 35th Annual Hawaii International Conf. on System Sciences*, pp. 841-846, Jan. 2002.
- [10] X. Nong and L. Dichen, "Nonlinear stabilized controller design for TCSC," in *IEEE Conf. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 2069-2099, Apr. 2008.
- [11] G. Escobar, A. M. Stankovic, P. Mattavelli, and R. Ortega, "A comparative study of three nonlinear controllers for TCSC," in *Power Tech Proc.*, vol. 2, Porto, Sep. 2001.
- [12] R. Ghazi, A. Azemi, and K. Pour Badakhshan, "Adaptive fuzzy sliding mode control of SVC and TCSC for improving the dynamic performance of power systems," in *Proc. 7th Int. Conf. on AC - DC Power Transmission, IET Conf.*, pp. 333-337, Nov. 2001.
- [13] T. Sansawatt and I. Ngamroo, "Sliding mode control design of TCSC for robust power system stabilization using dynamic compensation observer technique," in *Proc. 41st Int. Conf. UPEC '06*, vol. 2, pp. 447-451, Sep. 2006.
- [14] U. Yolac and T. Yalcinoz, "Comparison of fuzzy logic and PID controllers for TCSC using Matlab," in *Proc. 39th Int. Conf. UPEC '04*, vol. 1, pp. 438-442, Sep. 2004.
- [15] X. Tan, N. Zhang, L. Tong, and Z. Wang, "Fuzzy control of thyristor controlled series compensator in power system transients," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 110, no. 3, pp. 429-436, May 2000.
- [16] S. Hameed, "Power system stability enhancement using reduced rule base self-tuning fuzzy PI controller for TCSC," in *Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition*, 8 pp., Apr. 2010.
- [17] A. Oudalov, R. Cherkaoui, and A. J. Germond, "Application of fuzzy logic techniques for the coordinated power flow control by multiple

نشان‌دهنده پاسخ گذاری سریع و رفتار حالت ماندگار کنترل‌کننده پیشنهادی با کمترین خطای ممکن می‌باشد.

جدول پ-۱: پارامترهای سیستم.

پارامتر	مقدار
$V_S$ (kV)	۲۳۰
$V_R$ (kV)	۲۲۵٫۴
$L_1$ (mH)	۲۵٫۰۸
$L_{1-11}$ (mH)	۷۰٫۱۶
$L_r$ (mH)	۶۳٫۱۴
$R_{Gr}$ ( $\Omega$ )	۲٫۳۸
$R_{GS}$ ( $\Omega$ )	۱٫۳۲
$f$ (Hz)	۶۰

به‌منظور مقایسه بهتر عملکرد کلیه کنترل‌کننده‌های طراحی شده، در جداول ۲ تا ۴ اطلاعات مربوط به پاسخ کنترل‌کننده‌ها اعم از مقدار بالازدگی نسبت به حالت دائم، خطای حالت ماندگار، نوسان توان در حالت ماندگار، زمان نشست و زمان بالازدگی ارائه شده است.

از طرفی فراجهبش نسبت به حالت ماندگار پاسخ سنجیده می‌شود و به‌دلیل این که در کنترل‌کننده ANFIS خروجی فقط با تغییر توان مرجع  $P_{Set}$  تغییر می‌کند، انتظار می‌رود که ANFIS (هر چند دارای خطای حالت ماندگار است) دارای کمترین میزان بالازدگی باشد. به‌علت خاصیت اصلاح‌شوندگی کنترل‌کننده فازی - ANFIS میزان بالازدگی کمتری نسبت به کنترل‌کننده ANFIS انتظار می‌رود.

با توجه به جداول ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده فازی رفتار گذرای بسیار مناسب‌تری نسبت به کنترل‌کننده PID دارد. هرچند که نوسانات حالت ماندگار آن نسبت به کنترل‌کننده PID کمی بیشتر است. به احتمال زیاد نیز می‌توان با تغییر تعداد و نوع توابع عضویت و قوانین در این کنترل‌کننده این نوسانات حالت ماندگار را تا حد زیادی کاهش داد. با این‌گونه اصلاحات (یا بهینه‌سازی فازی) حتی رفتار کنترل‌کننده فازی - ANFIS نیز بهینه‌تر خواهد شد.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله به کمک کنترل‌کننده‌های PID، فازی و ANFIS به کنترل پیوسته توان اکتیو عبوری از یک خط انتقال در حضور TCSC پرداخته شد. با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از مدل سیستم، کنترل‌کننده ANFIS به‌صورت حلقه‌باز طراحی شده و آموزش آن به‌صورت Offline و با استفاده از داده‌های سیستم بدون حضور کنترل‌کننده انجام گرفت. همان‌گونه که از نتایج شبیه‌سازی نیز مشاهده گردید، کنترل‌کننده طراحی‌شده ANFIS به‌صورت حلقه‌باز دارای عملکرد مناسبی است، اما دارای مشکلات مربوط به کنترل حلقه‌باز (به‌خصوص وجود خطای حالت دائم) می‌باشد. برای این که وابستگی کنترل‌کننده نسبت به تغییر پارامترها و حتی خطای احتمالی حالت ماندگار کمتر شود، از ترکیب این کنترل‌کننده با کنترل‌کننده ساده فازی طراحی‌شده استفاده شد. نتیجه به‌دست آمده این که مجموعه حتی در اثر وجود نامعینی‌ها در سیستم، تغییرات نقطه کار و پارامترهای سیستم، کنترل‌کننده مقاومی محسوب می‌شود.

## پیوست

پارامترهای سیستم به همراه TCSC نشان داده شده در شکل ۱ به

**عباس کارگر** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۱، ۱۳۷۴ و ۱۳۷۹ در دانشگاه صنعتی اصفهان به پایان رسانده است و هم اکنون استادیار گروه مهندسی برق دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهرکرد می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های قدرت، الکترونیک قدرت، سیستم‌های هوشمند، کوره‌های قوس الکتریکی و فیلتراهای فعال قدرت.

**محسن حسین زاده سورشجانی** در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را در گرایش الکترونیک از دانشگاه شهرکرد و در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را در گرایش قدرت از همان دانشگاه دریافت نمود. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند ادوات FACTS، درایوهای الکتریکی، کنترل هوشمند و کنترل غیرخطی می‌باشد.

series FACTS devices," in *Proc. Power Industry Computer Applications, PICA 2001*, pp. 74-80, May 2001.

- [18] S. A. Nabavi Niaki, R. Irvani, and M. Noroozian, "Power - flow model and steady - state analysis of the hybrid flow controller," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2330-2338, Oct. 2008.
- [19] J. S. R. Jang, "ANFIS: adaptive - network - based fuzzy inference system," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, May/Jun. 1993.

Archive of SID