

## طراحی سیستم کنترل فازی زاویه IGV در توربین گازی میتسوبیشی نیروگاه قم

محمد رضا دولیخانی<sup>۱</sup>، حمید رضا خلیلی<sup>۱</sup>

۱- شرکت مدیریت تولید برق قم

### چکیده:

در سال های گذشته استفاده از توربین های گازی در نیروگاه ها برای تولید انرژی الکتریکی افزایش چشمگیری داشته است. هوای مورد نیاز برای احتراق در توربین های گازی، توسط کمپرسور تامین می شود. در این مقاله هدف طراحی کنترلر فازی برای تعیین زاویه IGV در هنگام راه اندازی و توقف واحد است. در حال حاضر منطق کنترلی پیاده سازی شده در نیروگاه قم یک کنترلر کلاسیک از نوع PI می باشد. با توجه به خصوصیات کنترلر PI، زمان زیادی برای پاسخ دهی به تغییرات سرعت در هنگام راه اندازی یا توقف واحد نیاز است. نتایج به دست آمده از کنترلر فازی نشان دهنده حساسیت بالا و سرعت پاسخ دهی مناسب برای تعیین زاویه IGV در دوره های مختلف منطبق بر نمودارهای واقعی می باشد. لازم به ذکر است که در مدل سازی فازی از مقادیر واقعی زاویه IGV در مدارک شرکت سازنده توربو کمپرسورهای واحدهای گازی نیروگاه قم استفاده شده است. خروجی کنترلر فازی تابعی از سرعت محور توربین و تغییرات سرعت محور توربین در هنگام راه اندازی و یا توقف توربین گازی است.

واژگان کلیدی: توربین گازی، IGV، کنترلر فازی، سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS)

### ۱- مقدمه:

های عصبی می تواند با دقت بالایی پارامترهای مورد نظر را پیش بینی کند [۲].

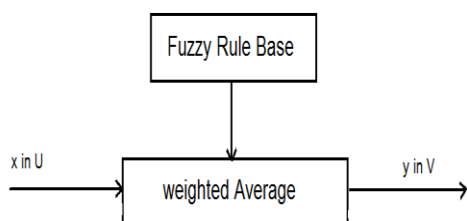
آموزش شبکه عصبی نیاز به در دست داشتن داده های ورودی و خروجی دارد. داده های ورودی در این مقاله سرعت محور توربین گازی و تغییرات آن است که در هنگام بهره برداری ثبت می شوند، بنابراین داده های واقعی ورودی بدون صرف هزینه و در حین بهره برداری در دسترس هستند. داده های خروجی نیز با استفاده از مدارک موجود شرکت سازنده برای مقادیر مختلف زاویه IGV در نیروگاه قم برای آموزش شبکه عصبی استفاده شده است. همچنین به روز کردن شبکه عصبی با تغییر در مقادیر داده های ورودی خروجی در آموزش شبکه به سادگی امکان پذیر است.

در این مقاله با اعمال مقادیر واقعی، میزان خطا و تکرار در آموزش شبکه عصبی و همچنین صفحه فازی که خروجی شبکه عصبی - فازی است نشان داده شده است. در قسمت نتایج میزان تغییرات زاویه IGV در راه اندازی توربین گازی در محدوده

در برخی از کمپرسورهای محوری مانند کمپرسورهای نیروگاه قم یک ردیف پره های ثابت با زاویه متغیر وجود دارد که اصطلاحاً Inlet Guide Vane (IGV) یا Nozzle Guide Vane (NGV) نامیده می شود. باز شدن این پره ها در حین راه اندازی توربین گاز و همزمان با بالا رفتن دور، سبب افزایش مقدار هوای ورودی به درون کمپرسور می گردد. همچنین وجود این پره ها از بروز پدیده مخرب استال در کمپرسورها جلوگیری می کند. در واقع نقش پره های متغیر یا IGV افزایش مقدار هوای ورودی به کمپرسور و در نتیجه کاهش سرعت و همچنین تصحیح مسیر حرکت هوا به روی پره های کمپرسور برای جلوگیری از پدیده مخرب استال می باشد. به دلیل اهمیت کارکرد مناسب این پره ها، نیاز به طراحی کنترلی مناسب برای تعیین زاویه این پره ها در زمان کارکرد توربین گازی داریم [۱].

مدل های ریاضی که با استفاده از قوانین ترمودینامیکی به دست آمده بر مقادیر واقعی نیروگاه منطبق نیستند در حالی که آموزش مناسب و دقیق با استفاده از داده های واقعی در شبکه

دوره‌های مهم آورده شده است که سرعت عملکرد کنترلر فازی را نشان می‌دهد.



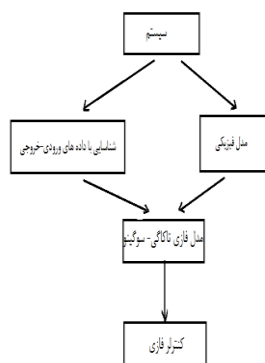
شکل شماره ۳: ساختار اصلی سیستم فازی TSK [۴].

۲-۳- مدل فازی سوگینو:

مدل فازی سوگینو (یا مدل فازی TSK) به وسیله تاکاگی، سوگینو و یانگ در سال ۱۹۸۵ ارائه شد. این مدل برای بیان و مدلسازی سیستم‌های دینامیکی پیچیده به کار می‌رود. مدل فازی سوگینو روشی سیستماتیک برای ایجاد قواعد فازی از مجموعه داده‌های ورودی-خروجی در یک سیستم است.

طراحی ساختار مدل فازی T-S:

شکل شماره ۴ روش طراحی کنترل فازی بر اساس مدل T-S را نشان می‌دهد. برای طراحی کنترلر فازی در یک سیستم ابتدا باید مدل T-S برای سیستم مذکور ارائه گردد. در این قسمت چگونگی طراحی ساختار مدل فازی T-S را بیان می‌کنیم [۴].



شکل شماره ۴: طراحی کنترل فازی بر اساس مدل T-S [۴].

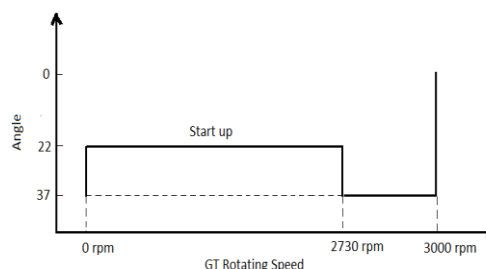
به طور کلی دو روش برای طراحی ساختار فازی وجود دارد: (۱) شناسایی (مدل سازی فازی) با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی

(۲) استخراج مدل فازی از معادلات غیرخطی سیستم دینامیکی

بسیاری از مقالات علمی در زمینه مدل سازی فازی با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی تا به حال ارائه شده است. این روش عمدتاً شامل دو مرحله می‌شود، شناسایی ساختار و شناسایی پارامترها. این روش خصوصاً برای سیستم‌هایی مناسب است که ارائه آن‌ها با مدل‌های فیزیکی یا تحلیلی غیر

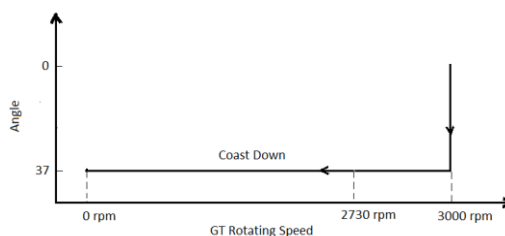
۲- زاویه IGV در راه اندازی و توقف:

در توربین گازی نیروگاه قم، کمپرسور دارای ۴۶ عدد IGV می‌باشد که در حالت بسته دارای زاویه ۳۷° با محور توربین است. در دور ۲۷۳۰ rpm که بلیدولهای LP و HP (Air Bleed Valve) بسته می‌شوند، IGV از حالت ۲۲° به ۳۷° بسته می‌شود و در دور ۳۰۰۰ rpm زاویه IGV به حالت صفر درجه می‌رسد و کاملاً باز می‌شود. منحنی این تغییرات در شکل شماره ۱ آورده شده است [۵].



شکل شماره ۱: منحنی تغییر زاویه IGV در راه اندازی [۵].

در هنگام توقف توربین‌های گازی نیز منحنی تغییرات زاویه IGV مطابق شکل شماره ۲ می‌باشد. همان‌طور که در منحنی شکل زیر می‌بینیم هنگامی که دستور توقف واحد و یا هنگام بروز مشکل و توقف اضطراری توربین گازی، زاویه IGV در دور ۳۰۰۰ rpm از حالت کاملاً باز به حالت ۳۷° بسته می‌شود و این زاویه تا توقف کامل حفظ می‌شود.



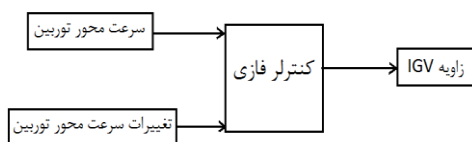
شکل شماره ۲: منحنی تغییر زاویه IGV در توقف [۵].

۳- سیستم‌های فازی

۱-۳- سیستم‌های تاکاگی، سوگینو و یانگ TSK:

در این سیستم‌ها از قواعدی به شکل (FP ۱) Then (FP ۲) If استفاده نمی‌کنند. در این سیستم‌ها بخش آن‌گاه قواعد فازی از یک عبارت توصیفی با مقادیر زبانی به یک رابطه ریاضی ساده تبدیل می‌شود.

ورودی کنترلر فازی سرعت محور توربین و تغییرات آن و خروجی کنترلر میزان زاویه IGV می باشد.



شکل شماره ۶: شماتیک کلی کنترلر فازی، ورودی و خروجی

نکته قابل توجه اینکه سرعت محور توربین و همچنین تغییرات آن در نیروگاه قم در دسترس می باشد و نیازی به استفاده از سنسورهای اندازه گیری سرعت و شتاب محور توربین نیست.

برای استفاده از مدل فازی سوگینوی مرتبه اول باید به این نکته توجه داشته باشیم که تنها یک خروجی خواهیم داشت ولی تعداد ورودی ها می توانند با توجه به طراحی کنترلر فازی به تعداد دلخواه باشند. برای استفاده از ساختار ANFIS باید داده های ورودی و خروجی به فرم ماتریس زیر مرتب شوند:

$$w = [Input \ 1 \ Input \ 2 \ \dots \ Input \ i \ Output]$$

باید به این نکته توجه داشته باشیم که خروجی و هر یک از ورودی ها به شکل یک بردار ستونی می باشند.

با توجه به این که در این مقاله سرعت و تغییرات سرعت محور توربین به عنوان ورودی کنترلر فازی در نظر گرفته شده اند و خروجی مورد نظر ما مقدار زاویه IGV می باشد، پس می توانیم ماتریس ورودی به شبکه ANFIS را به صورت زیر نشان دهیم.

فرض می کنیم ورودی  $x$  دارای دو تابع عضویت  $A_1$  و  $A_2$  و ورودی  $y$  دارای دو تابع عضویت  $B_1$  و  $B_2$  باشد، آن گاه چهار قانون کنترلی از نوع سوگینوی مرتبه اول به شکل زیر خواهیم داشت:

ممکن یا بسیار سخت باشد. از طرفی معمولاً در سیستم های مکانیکی، معادلات دینامیکی را می توان با روش هایی مانند روش لاگرانژ یا روش اولر نیوتون استخراج کرد. در چنین مواردی، روش دوم طراحی ساختار مدل فازی یعنی استخراج مدل فازی از معادلات دینامیکی سیستم مناسب تر است [۴].

۳-۳- سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS):  
ساختارهای مختلفی به عنوان شبکه های فازی عصبی می توان طراحی کرد. در این قسمت کلاسی از شبکه های فازی عصبی تطبیقی که به عنوان یک چهارچوب اساسی برای سیستم های استنتاج فازی به کار می رود، بررسی می شود. این شبکه توسط جانگ در سال ۱۹۹۶ ارائه شد. شبکه به ANFIS معروف است که از حروف اول "سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی" گرفته شده است. در این نوع از شبکه فازی ابتدا سیستم فازی به کمک روشهای مختلف فازی مدل می شود. سپس این سیستم فازی به شبکه عصبی معادل می شود. از جمله روش های مورد استفاده در طراحی مدل فازی، روش TSK است که دارای ورودی فازی و خروجی غیرفازی است [۴].

• ساختار شبکه فازی ANFIS:

برای بیان ساختار شبکه ANFIS سیستم شکل شماره ۵ با دو ورودی و یک خروجی را در نظر می گیریم:



شکل شماره ۵: سیستم با دو ورودی و یک خروجی

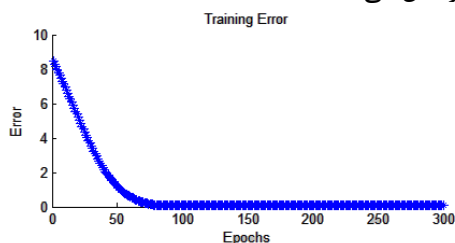
فرض می کنیم ورودی  $x$  دارای دو تابع عضویت  $A_1$  و  $A_2$  و ورودی  $y$  دارای دو تابع عضویت  $B_1$  و  $B_2$  باشد، آن گاه چهار قانون کنترلی از نوع سوگینوی مرتبه اول به شکل زیر خواهیم داشت:

if  $x$  is  $A_1$  AND  $y$  is  $B_1$ : Then  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$   
 if  $x$  is  $A_2$  AND  $y$  is  $B_2$ : Then  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$   
 if  $x$  is  $A_1$  AND  $y$  is  $B_2$ : Then  $f_3 = p_3x + q_3y + r_3$   
 if  $x$  is  $A_2$  AND  $y$  is  $B_1$ : Then  $f_4 = p_4x + q_4y + r_4$

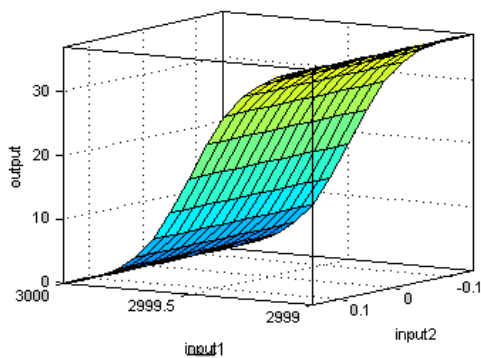
خروجی مطلوب برای ما برابر است با:

$$f = \frac{w_1f_1 + w_2f_2 + w_3f_3 + w_4f_4}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4}$$

که در آن  $w_1, w_2, w_3, w_4$  حاصل استنتاج یا وزن مربوط به هر یک از قوانین می باشند. ساختار ANFIS نیاز ما را برای اجرای این قوانین با تبدیل قوانین فازی به شبکه عصبی برآورده می کند [۴]. شماتیک کلی کنترلر فازی، ورودی ها و خروجی آن در شکل شماره ۶ آورده شده است. همان طور که می بینیم

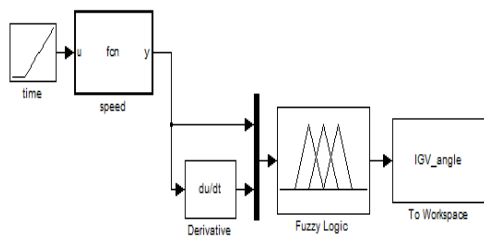


شکل شماره ۷: نمودار میزان خطا و تعداد تکرار در آموزش شبکه عصبی- فازی



شکل شماره ۱۰: تصویر صفحه فازی طراحی شده به وسیله ANFIS در محدوده ۳۰۰۰rpm

شماتیک کنترلر طراحی شده در نرم افزار MATLAB و در محیط Simulink شماره ۱۱ آورده شده است.



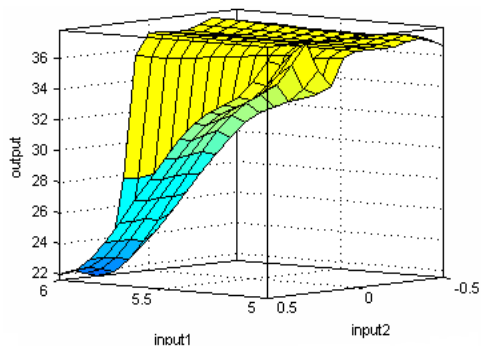
شکل شماره ۱۱: شماتیک کنترلر طراحی شده در نرم افزار MATLAB و در محیط Simulink

#### ۴- نتایج:

نیاز به استفاده از کنترلرهای پیشرفته برای داشتن حساسیت بالا، زمان پاسخ دهی مناسب و جلوگیری از اختلال در کارکرد تجهیزات نیروگاهی کاملاً محسوس است. طراحی کنترلر فازی به دلیل اهمیت بسیار بالای مقدار زاویه IGV و تغییرات آن در حین راه اندازی و توقف توربین های گازی نیروگاه قم صورت گرفته است.

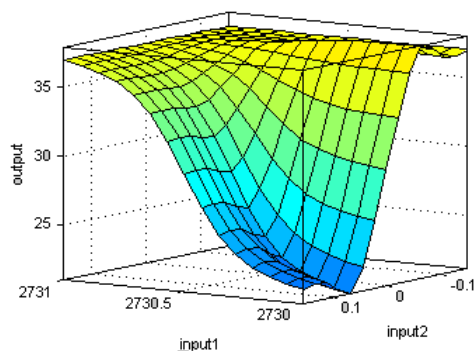
برای نشان دادن صحت عملکرد کنترلر فازی در شکل های شماره ۱۲ تا ۱۵ مقدار زاویه IGV در راه اندازی و توقف توربین گازی (که خروجی کنترلر فازی می باشد) نشان داده شده است. در شکل شماره ۱۴ تغییرات زاویه IGV هنگام راه اندازی و در دور ۳۰۰۰ بر حسب زمان آورده شده است. برای نشان دادن دقت کنترلر طراحی شده، عملکرد آن در محدوده دورهای حساس با کنترلر PI مقایسه شده است. همان طور که می بینیم تغییرات زاویه IGV با استفاده از کنترلر فازی در زمان کوتاه و با دقت بسیار بالایی صورت گرفته است.

برای نشان دادن دقت کنترلر فازی طراحی شده، محدوده ۵ تا ۶ rpm را که لحظه باز شدن IGV از ۳۷° به ۲۲° است را نشان می دهیم. نکته قابل ذکر این که در نیروگاه قم هنگامی که موتور استارتینگ وارد مدار می شود، دور شفت از ۵rpm رو به افزایش می رود و IGV شروع به باز شدن می کند. باید دقت داشته باشیم که در هنگام کاهش دور شفت در توقف واحد نیز به محدوده ۵ تا ۶ rpm میرسیم ولی تغییرات سرعت در این حالت منفی است. صفحه فازی طراحی شده به وسیله ANFIS در شکل شماره ۸ به خوبی تغییرات زاویه IGV در محدوده ۵ تا ۶ rpm را نشان می دهد.

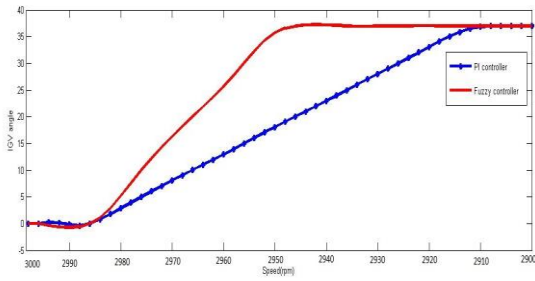


شکل شماره ۸: تصویر صفحه فازی طراحی شده به وسیله ANFIS در محدوده ۵ تا ۶ rpm

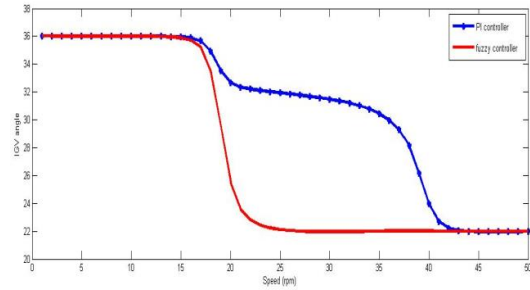
برای نشان دادن صحت نتایج خروجی ANFIS ، صفحه فازی حاصل از قوانین فازی را در محدوده دورهای ۲۷۳۰ rpm و ۳۰۰۰ rpm در شکل های شماره ۹ و ۱۰ نشان می دهیم.



شکل شماره ۹: تصویر صفحه فازی طراحی شده به وسیله ANFIS در محدوده ۲۷۳۰rpm



شکل شماره ۱۵: مقدار زاویه IGV در توقف توربین گازی در ۳۰۰۰rpm



شکل شماره ۱۲: مقدار زاویه IGV در ابتدای راه اندازی

مراجع:

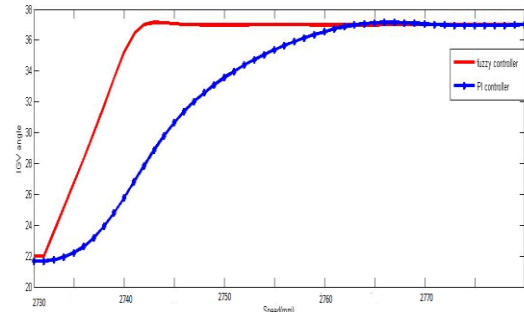
[۱]Gallar, L., Pachidis, V. and Singh, R., Compressor IGV off design performance and loss modelling, International Symposium of Air Breathing Engines, ۲۰۰۹ Paper ۱۲۲۱, ۲۰۰۹

[۲]Dennis, J.E. and Schnabel, R.B., Numerical methods for unconstrained optimisation and nonlinear equations, Prentice Hall, ۱۹۸۳.

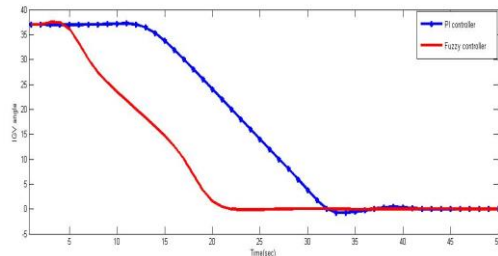
[۳] "سیستم های کنترل خطی"، دکتر علی خاکی صدیق، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۳۷۷.

[۴] "سیستم های فازی و کنترل فازی"، محمد تشنه لب و نیما صفارپور، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۷۸.

[۵] منوال بهره برداری توربین های گازی نیروگاه قم، MOH.



شکل شماره ۱۳: مقدار زاویه IGV در راه اندازی در ۲۷۳۰ rpm



شکل شماره ۱۴: مقدار زاویه IGV در راه اندازی توربین گازی در ۳۰۰۰rpm بر حسب زمان