

استراتژی جدید کنترلی بمنظور میرایی نوسانات مکانیکی توربین کاپلان در نیروگاه آبی

امیر حسن نیا خیبری، احمد دارابی

دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

amir.hassannia@gmail.com

واژه‌های کلیدی: نیروگاه آبی، توربین کاپلان، پایداری فرکانس، کنترل فازی.

چکیده

تثبیت فرکانس شبکه مهمترین عامل در پایداری یک سیستم قدرت است که معمولاً توسط نیروگاههای آبی انجام می‌شود. ثابت زمانی کوتاه و کارایی بالا در نوسانات مکانیکی، قابلیت‌های زیادی را در پاسخ سریع این نیروگاهها به اغتشاشات فرکانس فراهم کرده است، اما معمولاً استفاده از کنترلرهای معمولی *PID* باعث عدم استفاده از تمامی قابلیت‌های این نیروگاهها در کنترل فرکانس شبکه می‌شود. در این مقاله یک کنترلر چندمتغیره با ترکیب کنترلرهای فازی و *PID* برای یک نیروگاه آبی مجهز به توربین کاپلان طراحی شده که بطور همزمان سیگنال‌های کنترل دریچه آب ورودی و زاویه تیغه‌های توربین را تولید می‌کند. ورودی‌های این کنترلر شامل سیگنال‌های سرعت رتور، فرکانس شبکه، توان خروجی ژنراتور، موقعیت دریچه ورودی آب و زاویه تیغه‌های توربین است. عملکرد این سیستم در مقایسه با کنترلر *PID* معمولی بسیار بهتر بوده و با شبیه‌سازی کل سیستم در محیط *MATLAB* بررسی شده است.

مقدمه

نظریه مجموعه‌های فازی برای نخستین بار در سال 1965 توسط پرفسور لطفی‌زاده مطرح شد [1]. از آن زمان تاکنون پیشرفت‌های زیادی در این نظریه حاصل شده است. کنترل کننده‌های فازی بسیار توسعه یافته و کاربرد زیادی در تکنولوژی یافته‌اند [2]. استفاده از کنترل کننده‌های فازی در سیستم‌های قدرت باعث بهبود پایداری و قابلیت اطمینان شبکه‌ها شده است. پایداری فرکانس در سیستم‌های قدرت تا حد زیادی وابسته به کنترل دقیق فرکانس در نیروگاههای آبی است، زیرا معمولاً کنترل فرکانس شبکه‌های قدرت توسط این نوع از نیروگاهها انجام می‌شود. نیروگاههای آبی کارایی زیادی در کنترل سریع نوسانات مکانیکی و اغتشاشات فرکانس شبکه دارند. اما استفاده بهینه از این کارایی بالا نیازمند بکارگیری کنترل کننده‌های روبات و سریع می‌باشد. در این مقاله یک کنترل کننده چندمتغیره با ترکیب کنترلرهای فازی و *PID* برای یک نیروگاه آبی دارای توربین کاپلان، طراحی شده که بطور همزمان دریچه آب ورودی و زاویه

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

ماشین استفاده شده است [3]. بدین ترتیب طیف وسیعی از هارمونیک‌های فضایی در مدل لحاظ می‌شوند و بنابراین مدل، تحلیل دقیق‌تری از ماشین را ارائه می‌دهد. معادلات ولتاژ ماشین به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$[\lambda] = [L(\theta)][i] \quad (1)$$

$$[e] = \frac{d[\lambda]}{dt} \quad (2)$$

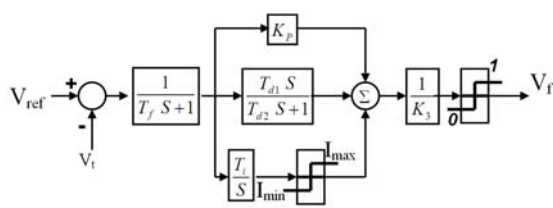
که در آن $[\lambda]$ بردار شارهای ارتباطی، $[i]$ بردار جریان‌ها و $[e]$ بردار ولتاژهای القایی در سیم‌پیچ‌های ماشین است.

تنظیم کننده ولتاژ

بطور کلی نوسانات ولتاژ و فرکانس در شبکه تاثیر چندانی بر یکدیگر ندارند. اما در این مقاله برای بررسی دقیق‌تر عملکرد سیستم کنترل فرکانس و در نظر گرفتن تاثیرات جزئی تغییرات ولتاژ بر آن، یک تنظیم کننده ولتاژ خودکار PID مدل سازی شده است. عملکرد این تنظیم کننده بدقت مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای آن بهینه سازی شده است [4]. این پارامترها بصورت زیر است.

$$T_f = 0.046, \quad K_p = 4.8, \quad T_{d1} = 0.345, \quad T_{d2} = 0.0067$$

$$T_i = 13, \quad I_{max} = 5.1, \quad I_{min} = -5.1, \quad 0 < V_f < 1$$



شکل 2: مدل تنظیم کننده ولتاژ خودکار

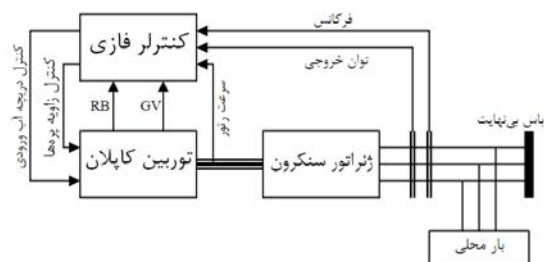
توربین آبی

توربین آبی از نوع کاپلان که در این نیروگاه استفاده شده است، با معادلات دقیق مدل سازی می‌شود که از مدل‌های استاندارد IEEE و مدل‌های دقیق دیگر استخراج شده است [5]. جریان آب و توان این توربین توسط دریچه ورودی و زاویه پره‌های توربین کنترل می‌شود که نیازمند ملاحظات ظریفی در مدل سازی توربین است. توربین کاپلان برخلاف

تیغه‌های توربین آبی را کنترل می‌کند. هماهنگی سیگنال‌های کنترلی این دو متغیر، تاثیر زیادی بر میرایی سریع‌تر نوسانات فرکانس شبکه دارد. استراتژی پیچیده کنترلی بکارگرفته شده در این کنترل کننده باعث هماهنگی کامل سیگنال‌های کنترلی و عملکرد بسیار بهتر سیستم در مقایسه با کنترل کننده معمولی PID شده است. ژنراتور آبی به همراه سیستم‌های کنترلی آن بطور کامل مدل سازی شده و عملکرد کنترل کننده‌های مختلف، با شبیه سازی مقایسه گردیده است.

مدل سازی

سیستم در نظر گرفته شده برای شبیه سازی و مطالعه، شامل یک ژنراتور سنکرون با توربین کاپلان بوده که یک بار محلی را تغذیه نموده و مطابق شکل 1 به شبکه باس بینهایت متصل است. این شبکه دارای سیستم کنترل ولتاژ و یک کنترل کننده فرکانس PID می‌باشد. در این سیستم یک کنترل کننده چندمتغیره هیبرید طراحی و مدل سازی شده که جایگزین کنترلر معمولی PID می‌شود و نتایج حاصل از آن با کنترل کننده PID معمولی مقایسه می‌شود. هر یک از المان‌های این سیستم با معادلات دقیق مدل می‌شوند.



شکل 1: سیستم شبیه سازی شده

مدل سازی ژنراتور

ژنراتور یکی از المان‌های مهم سیستم قدرت است که از محدوده عملکرد دینامیکی وسیعی برخوردار می‌باشد. جهت بررسی عملکرد سیستم کنترل فرکانس، ژنراتور قطب برجسته بکار رفته در این نیروگاه آبی، در فریم اصلی abc مدل می‌شود. برای این مدل سازی از تحلیل اجزای محدود برای محاسبه اندوکتانس‌های وابسته به موقعیت روتور $(L(\theta))$

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

فرکانس می‌باشد. در واقع نوسانات توان و فرکانس در شبکه، شدیداً به یکدیگر وابسته بوده و در اغلب مقالات یکسان فرض شده‌اند. اما شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد سرعت تغییرات زاویه پره‌های توربین در میرایی نوسانات فرکانس شبکه بیشتر از تغییرات دریچه آب ورودی است، در حالیکه تاثیر دریچه آب ورودی در کنترل توان مکانیکی توربین بیشتر از تغییرات زاویه پره‌های آن می‌باشد. بر همین اساس در طراحی کنترل‌کننده جدید تاثیر سیگنال خطای فرکانس در کنترل زاویه پره‌های توربین بیش از تاثیر سیگنال خطای توان لحاظ شده است. و بطور مشابه، سیگنال موثر در کنترل موقعیت دریچه آب، خطای توان می‌باشد. در واقع شبیه‌سازی مدل توربین کاپلان نشان می‌دهد که تغییر ناگهانی زاویه پره‌های توربین سبب ایجاد شوک در سرعت آن می‌شود. در این مقاله، کنترل‌کننده فازی بگونه‌ای طراحی شده که با ایجاد شوک سرعت در جهت مناسب، باعث میرایی سریع‌تر نوسانات مکانیکی توربین می‌شود. بنابراین پایداری فرکانس شبکه افزایش خواهد یافت.

هماهنگی کامل سیگنال‌های کنترلی به منظور دستیابی به میرایی بهتر و سریع‌تر اغتشاشات شبکه، نیازمند پیاده‌سازی یک استراتژی کنترلی پیچیده و بکارگیری سیستمی هوشمند در ساختار کنترلر است. از آنجائیکه سیستم‌های فازی دارای قابلیت انعطاف بسیار در کاربردهای کنترلی هوشمند می‌باشند، از دو سیستم فازی مشابه برای ارزیابی سیگنال‌های خطای توان و فرکانس در ساختار کنترلر، استفاده شده است. سیستم فازی دیگری با بررسی سیگنال‌های تولید شده و در نظر گرفتن موقعیت دریچه آب توربین، با هماهنگی کامل بین سیگنال‌های خروجی، در مورد کنترل دریچه آب و پره‌های توربین تصمیم‌گیری می‌کند. این سیستم دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به دو سیستم فازی دیگر است. توابع تعلق در ورودی‌های این سیستم، همگی از نوع مثلثی بوده و در سیگنال‌های خروجی از توابع گوسی استفاده شده است. قوانین فازی (Fuzzy Rules) حاکم بر کنترل‌کننده اصلی این سیستم در شکل‌های 4 تا 9 خلاصه شده است.

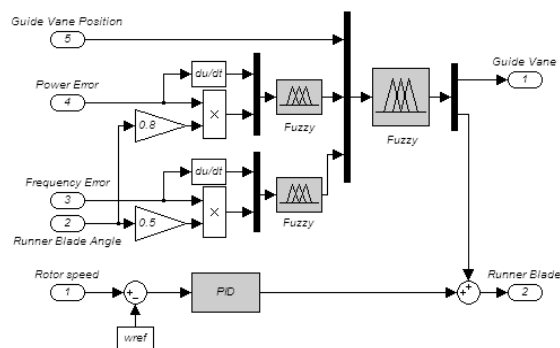
سایر انواع توربین‌ها، دارای قابلیت تغییر زاویه پره‌های آن در حین کار است. این قابلیت بمنظور تغییر مشخصه توربین هنگام تغییرات ارتفاع آب رودخانه برای دستیابی به راندمان حداکثر ایجاد شده است، اما در این مقاله از این قابلیت مهم توربین‌های کاپلان، برای کنترل نوسانات مکانیکی آن، استفاده شده است.

گاورنر

گاورنر سیستمی است که توان خروجی توربین را متناسب با توان بارهای الکتریکی متصل به شبکه تنظیم می‌کند [6]. مدل گاورنر و سروموتورهای آن از مدل‌های استاندارد IEEE استخراج گردیده است [5].

کنترلر فازی

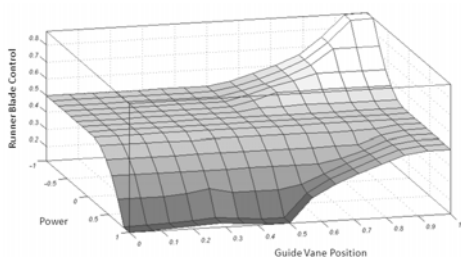
در سیستم کنترل فرکانس معمولی از سرعت رتور یا فرکانس سیستم نمونه‌برداری شده و با مقایسه آن با سیگنال مرجع، سیگنال خطا تولید می‌شود. کنترل‌کننده PID بر روی این سیگنال خطا عمل می‌کند. اما در کنترل‌کننده جدید، از چندین سیگنال شامل: سرعت رتور، فرکانس شبکه، توان خروجی ژنراتور، موقعیت دریچه آب و موقعیت پره‌های توربین نمونه‌برداری می‌شود. هر یک از این سیگنال‌ها به نحوی در کنترل دریچه آب و زاویه پره‌های توربین دخالت دارند. شکل 3 بلوک دیاگرام کلی این کنترلر را نشان می‌دهد.



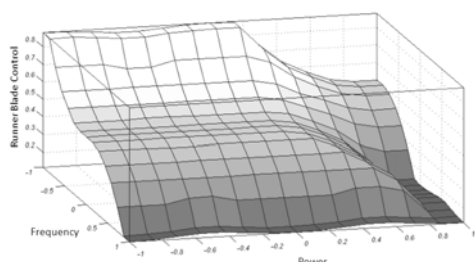
شکل 3: کنترل‌کننده فازی طراحی شده

ایده اساسی بکار گرفته شده در طراحی این کنترلر جدید، استفاده از کنترل‌کننده‌های مجزا در سیگنال‌های خطای توان و

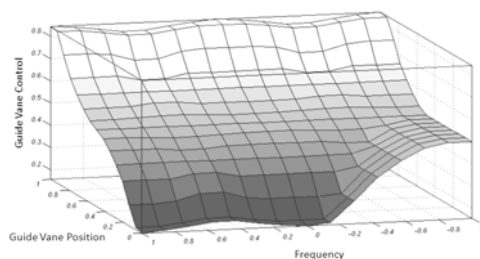
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



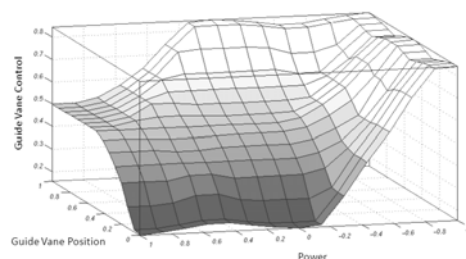
شکل 8: سطح منتهی از قوانین فازی توان- موقعیت دریچه آب- کنترل زاویه پره‌ها



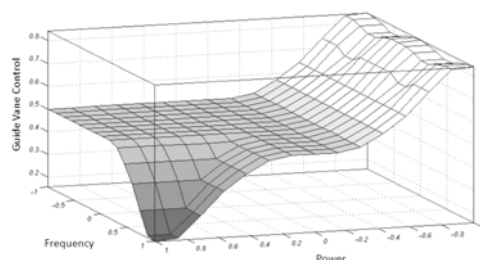
شکل 9: سطح منتهی از قوانین فازی فرکانس- توان- کنترل زاویه پره‌ها



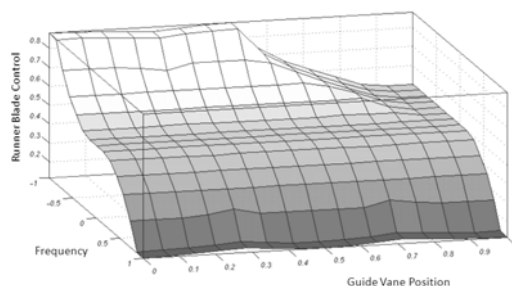
شکل 4: سطح منتهی از قوانین فازی فرکانس- موقعیت دریچه آب- کنترل دریچه آب



شکل 5: سطح منتهی از قوانین فازی توان- موقعیت دریچه آب- کنترل دریچه آب



شکل 6: سطح منتهی از قوانین فازی توان- فرمانس- کنترل دریچه آب



شکل 7: سطح منتهی از قوانین فازی فرکانس- موقعیت دریچه آب- کنترل زاویه پره‌ها

از سوی دیگر، بمنظور پاسخ سریع‌تر سیستم در مقابل نوسانات سرعت رتور، یک کنترل‌کننده PID که بصورت موازی با سیستم فازی عمل می‌کند، با استفاده از سیگنال خطای سرعت رتور مستقیماً زاویه پره‌های توربین را کنترل می‌نماید. بدین ترتیب، ساختار پیچیده کنترلی بکار گرفته شده، در شرایط دینامیکی مختلفی مانند قطع و وصل بار، اتصال کوتاه و... عملکرد بسیار بهتر و سریع‌تری نسبت به کنترل‌کننده‌های معمولی در میرایی اغتشاشات دارد. عملکرد این کنترل‌کننده در شرایط اتصال کوتاه و سوئیچینگ بار با کنترل معمولی مقایسه شده است.

شبیه‌سازی

عملکرد کنترل‌کننده جدید، از طریق شبیه‌سازی شرایط دینامیکی مختلف سیستم با کنترل معمولی PID مقایسه شده است. پیشرفته‌ترین روش‌های الگوریتم ژنتیک در تنظیم پارامترهای کنترلر PID برای رسیدن به بهترین پاسخ، بکار گرفته شده است [7]. البته افزایش بیشتر در گین این کنترل‌کننده، مشخصات پاسخ سیستم را تا حدی بهبود بخشیده اما ممکن است منجر به ناپایداری سیستم شود. بنابراین مقایسه

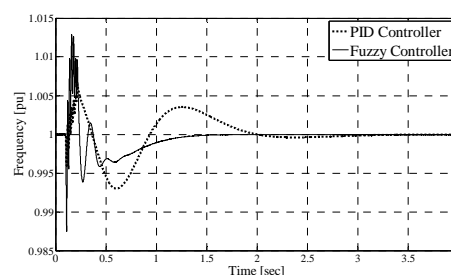
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

نسبتاً ضعیفی در کنترل دریچه آب و پره‌های توربین‌های آبی بمنظور تثبیت سرعت توربین در شرایط دینامیکی دارند. در این مقاله کنترل‌کننده چند متغیره جدیدی با ترکیب کنترل‌های فازی و PID طراحی و شبیه‌سازی شد که قادر است هماهنگی کاملی بین سیگنال‌های کنترلی دریچه آب ورودی و زاویه پره‌های توربین در شرایط اغتشاش ایجاد نماید. استراتژی بکارگرفته شده در ساختار این کنترلر بگونه‌ای است که تاثیر سیگنال خطای توان در کنترل دریچه آب بیشتر بوده و زاویه پره‌های توربین بطور موثر توسط سیگنال خطای فرکانس کنترل می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد عملکرد این کنترلر در شرایط دینامیکی بسیار بهتر از کنترل‌کننده معمولی PID است.

مراجع

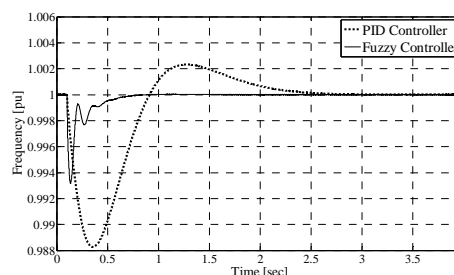
- [1] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", Information and Control, pp. 338-353, 1965.
- [2] K.S. Jayaram, S. Salama, "Fuzzy logic based supplementary controller for static synchronous series compensator", IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 2, pp. 489-492, 1998.
- [3] A. Darabi, "Auxiliary windings, supplying the AVR of a brushless synchronous generator", Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Vol. 1, pp. 81-85, Sept 2005.
- [4] A. Darabi, C. Tindall, "Analogue AVR model for use in real time transient simulation of small salient pole alternators", International Conference on Power Electronics, Machine and Drives, pp. 451-455, 16-18 April 2002.
- [5] IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 6, Nov/Dec 1973, pp. 1904-1915.
- [6] J.S. Gulliver, Hydropower Engineering Handbook-ISBN 007025-51932, McGraw-Hill, 1990.
- [7] G. Wang, M. Zhang, X. Xu, C. Jiang, "Optimization of Controller Parameters Based on the Improved Genetic Algorithms", Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 - 23, 2006, Dalian, China.

در شرایطی انجام می‌شود که کنترلر PID بهترین عملکرد ممکن را دارد. شبیه‌سازی خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن بگونه‌ای است که اتصال کوتاه اعمال شده در ترمینال ژنراتور پس از 5 سیکل از بین می‌رود. پاسخ‌های مختلف سیستم در مقابل این خطا با استفاده از کنترلر معمولی PID و کنترل‌کننده جدید در شکل 10 مقایسه شده است. با توجه به این شکل، عملکرد نسبتاً بهتر کنترل‌کننده جدید در این شرایط مشخص است.



شکل 10: نوسانات فرکانس سیستم هنگام ایجاد اتصال کوتاه ناگهانی در ترمینال ژنراتور

اتصال یک بار بزرگ به شبکه نیز منجر به نوسانات فرکانس سیستم می‌شود. شکل 11 مقایسه میرایی این نوسانات را هنگام بکارگیری کنترل‌کننده معمولی و کنترلر جدید در شرایطی نشان می‌دهد که بار 2 پریونیت به باس ژنراتور متصل شده است. این شکل نیز بیانگر عملکرد بهتر کنترل‌کننده جدید در شرایط اتصال ناگهانی بار است.



شکل 11: نوسانات فرکانس سیستم هنگام اتصال بار در ترمینال ژنراتور

نتیجه گیری

پایداری و تثبیت فرکانس شبکه‌های قدرت مستلزم بکارگیری کنترل‌کننده‌های مناسب در سیستم‌های کنترل فرکانس نیروگاه‌های آبی است. کنترل‌کننده‌های معمولی PID، عملکرد