

# توسعه مدل حلقه کنترل بار- فرکانس نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن ضریب دمپینگ توربین

جعفر عبادی<sup>۱</sup>

محمدحسین جاویدی دشت بیاض<sup>۲</sup>

ناصر پریز<sup>۳</sup>

۱- مربی- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد-مشهد- ایران

[ebadi@um.ac.ir](mailto:ebadi@um.ac.ir)

۲- استاد- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد-مشهد- ایران

[h-javidi@um.ac.ir](mailto:h-javidi@um.ac.ir)

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد-مشهد- ایران

[n-pariz@um.ac.ir](mailto:n-pariz@um.ac.ir)

**چکیده:** کنترل تولید متناسب با تغییرات بار از مهمترین وظایف سیستم‌های قدرت بمنظور بهره‌برداری ایمن از واحدهای نیروگاهی می‌باشد. به همین دلیل سیستم کنترل بار-فرکانس در واحدهای نیروگاهی یکی از مهمترین بخش‌های نیروگاه محسوب می‌گردد. این سیستم تحت عنوان سیستم کنترل اتوماتیک بار فرکانس شناخته می‌شود. اگر چه در مطالعات مرتبط با سیستم‌های قدرت به تغییرپذیری توان تولیدی توربین‌های نیروگاهی در اثر تغییر سرعت اشاره شده است، با این حال، تاکنون این اثر در مدل-سازهای مرسوم برای حلقه کنترل بار-فرکانس یا لحاظ نگردیده است و یا اثر آن بصورت توأم در ضریب وابستگی بار به فرکانس منظور شده است. این در حالی است که، ضریب وابستگی بار به فرکانس اساساً مرتبط به شبکه می‌باشد ولی ضریب دمپینگ توربین-ها که در مدل‌سازی مرسوم حلقه کنترل لحاظ نمی‌گردد، از خصوصیات توربین بوده و برای توربین‌های مختلف، تأثیر آن متفاوت می‌باشد.

در این مقاله، مدل توسعه یافته‌ای برای حلقه کنترل بار-فرکانس ارائه گردیده و با شبیه‌سازی بروی یک شبکه چندماشینه نشان داده شده است که استفاده از مدل مرسوم در برخی از مطالعات ممکن است به نتایج وتحلیل‌های ناصحیح منجر گردد. به کمک مدل ارائه شده می‌توان ضمن لحاظ نمودن ضریب دمپینگ توربین تک تک واحدهای نیروگاه‌ها، به تحلیل نقش هر کدام در مطالعات پرداخت، ضمن اینکه در پیچیدگی مطالعات تغییر چندانی ایجاد نمی‌گردد.

**کلمات کلیدی:** کنترل فرکانس، حلقه کنترل بار-فرکانس (ALFC)، ضریب دمپینگ توربین، توسعه مدل

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۶/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۲/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول: جعفر عبادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - مشهد- میدان آزادی- دانشگاه فردوسی مشهد- دانشکده‌ی مهندسی

توربین مدل شده است. برای توربین های آبی مدل های کامل تری در [2] ارائه شده است. در این مقاله، مسائل مرتبط با توربین های آبی از جمله اثرات الاستیسته آب، اصطکاک لوله، اثرات نازل ها و انواع گاورنرها مدل شده اند. در [3] مدل های مختلف برای توربین های گازی ارائه شده اند. در این مقاله همچنین، درباره مدل مناسب برای حرکت هوا، نسبت فشار کمپرسور، دمای گاز خروجی توربین، کنترل دما و توان خروجی بحث شده است. در [4]، مدل سازی برای واحدهای سیکل ترکیبی مورد توجه گرفته است.

برای مدل سازی رفتار الکتریکی ژنراتور سنکرون و تأثیر رفتار مکانیکی محور بر رفتار ژنراتور سنکرون، در سال ۱۹۵۲ هفرون<sup>۱</sup> و فیلیپس<sup>۲</sup> مدل خطی ساده برای یک ماشین سنکرون متصل به باس بی نهایت و یک بار امیدانسی محلی ارائه دادند [5]. بعدها، این مدل بصورت گسترده در مطالعات سیستم های قدرت مورد استفاده قرار گرفت. اعمال ایده های کنترل در سیستم های قدرت [6]، تأثیر رفتار سیستم تحریک بر پایداری سیستم قدرت [7]، اصول پایداری دینامیکی در سیستم های قدرت [8]، کنترل فرکانس در یک شبکه با دو ناحیه [9]، تعمیم مدل به سیستم چند ماشینه و طراحی پایداری سازی سیستم قدرت (PSS) بر اساس این مدل پیشنهادی [10] انجام گردید. در [11]، مجموعه ای از مطالعات سیستم های قدرت که بر اساس این مدل انجام گرفته است، گرد آوری شده است.

در مدل خطی پیشنهادی هفرون و فیلیپس، تأثیر مدار تحریک بر گشتاور مقاوم ژنراتور لحاظ شده است. این مدل، یک مدل پایه و بنیادی برای مطالعات سیستم های قدرت می باشد و امروزه در بسیاری از مطالعات سیستم های قدرت از آن استفاده می شود.

در مطالعات متداول امروز در سیستم های قدرت، بر اساس مدل ساده، توان توربین منحصراً بصورت تابعی از سیستم کنترل اتوماتیک توربین (گاورنر) و نقطه تنظیم سیستم نشان داده می شود. هر چند در برخی از مطالعات انجام شده برای مدل توربین، اثر تغییر سرعت بر توان توربین با استفاده از ضریب دمپینگ توربین مطرح شده است، با این حال، در مدل توربین با حضور گاورنر از اثر آن صرف نظر شده است [2].

هنگام بررسی اثرات تغییر فرکانس در سیستم های قدرت، این تغییرات با لحاظ نمودن پارامتر D، که وابستگی بار به فرکانس را نشان می دهد، در مدل سازی در نظر گرفته می شود و از آن به عنوان ضریب وابستگی بار به فرکانس<sup>۵</sup> نام برده می شود. این ضریب تغییر توان مصرفی شبکه در اثر تغییر فرکانس را نشان می دهد. بر همین اساس محاسبات مختلفی برای تعیین وابستگی بار به فرکانس و ولتاژ انجام گرفته است [12,13]. با این حال، در مدل سازی، وابستگی توان خروجی توربین به فرکانس صرف نظر شده است.

با مطالعه عمیق در مدل مرسوم، مشاهده می شود که عدم توجه به مدل سازی دقیق به مفاهیم اساسی سیستم توربین ژنراتور و در نظر نگرفتن وابستگی توان توربین به فرکانس در مدل سازی حلقه ALFC

یک سیستم قدرت متشکل از اجزاء مختلف می باشد. محاسبات و تحلیل یک سیستم قدرت بدون مدل سازی اجزاء مختلف این سیستم امکان پذیر نمی باشد. گرچه برای برخی از مطالعات استفاده از مدل های ساده می تواند به نتایج قابل قبولی منجر گردد، با این حال، تحلیل سیستم های قدرت در بسیاری از موارد بدون مدل سازی دقیق اجزاء آن امکان پذیر و قابل اعتماد نمی باشد. از جمله این موارد می توان به مدل سازی ژنراتورهای سنکرون و توربین های نیروگاهی در شرایط تغییرات فرکانس اشاره نمود.

در مدل سازی ژنراتورها به منظور بررسی تأثیر تغییرات فرکانس به این نکته باید توجه نمود که در چنین شرایطی، رفتار ژنراتورها علاوه بر ویژگی های الکتریکی اجزاء آن شامل مدار تحریک، سیم پیچ آرمیچر و تأثیرات متقابل آنها بر یکدیگر، از ویژگی های مکانیکی توربین چرخاننده خود نیز تأثیر می پذیرد. به دلیل این وابستگی متقابل بین اجزاء الکتریکی و مکانیکی، تقریب های در نظر گرفته شده در مدل سازی ژنراتورها می تواند تحلیل ها و نتایج مطالعات را غیرقابل اتکا نماید.

در مدل سازی مجموعه توربین و ژنراتور، ارائه و توسعه مدل توربین و تحلیل رفتار آن اساساً توسط محققین رشته مکانیک و بر اساس مسائل مورد توجه آنان صورت گرفته است. این در حالی است که مدل سازی ژنراتور و تحلیل رفتار آن بطور عمده توسط متخصصین رشته برق صورت گرفته است. از این جهت، بنظر می رسد که این مدل سازی مستقل، سبب گردیده است که در ارائه مدل ترکیبی به اثرات ناشی از تقریب های در نظر گرفته شده بر رفتار این مجموعه توجه جدی صورت گرفته نشده باشد. در این مقاله، ضمن توجه به این رفتار، مدل توسعه یافته ای برای حلقه کنترل بار-فرکانس نیروگاه ها در نظر گرفته شده است و سپس با مدل سازی و بررسی دقیق تر نشان داده شده است که عدم توجه به ساده سازی ها در مدل سازی ممکن است سبب غیرقابل اتکا بودن نتایج مطالعات گردد.

حلقه کنترل اتوماتیک بار-فرکانس<sup>۱</sup> (ALFC) مدل رایجی است که برای مدل سازی تغییرات فرکانس ژنراتور در مسائل مختلف سیستم های قدرت مورد استفاده قرار می گیرد. در این حلقه کنترلی، مدل ساده توربین و همچنین رفتار فرکانس-توان توربین و اثرات گاورنر لحاظ شده است. این حلقه کنترل، یک حلقه اساسی در کنترل پایدار نیروگاه ها محسوب می شود. این مدل، علی رغم سادگی، بسیاری از نیازهای اساسی را برآورده می سازد. با این حال، می توان، در صورت نیاز، مدل دقیق تری برای هر یک از اجزاء آن بدست آورد.

در زمینه مدل سازی توربین و تحلیل رفتار آن با توجه به نوع توربین مدل های مختلفی ارائه شده است. در [1] مدل های ساده و اساسی برای توربین های آبی و بخار ارائه شده است. در این مدل سازی رفتار اساسی سیستم مکانیکی و اثرات گاورنر و اصطکاک در رفتار

بلوک دیگری که در بلوک دیاگرام حلقه ALFC وجود دارد تابع انتقال سیستم قدرت را نشان می‌دهد (۱).

$$G_p(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1} = \frac{1}{K s + D} \quad (1)$$

در این تابع انتقال،  $K_p = \frac{1}{D}$  و  $T_p = \frac{2H}{f_0 D}$  یا  $K = \frac{2H}{f_0}$  می‌باشد. پارامتر  $H = \frac{W_{kin}^0}{P_n}$ ، ثابت اینرسی محور بر حسب پرینیت<sup>۶</sup> می‌باشد.  $P_n$  و  $W_{kin}^0$  به ترتیب انرژی جنبشی محور در سرعت نامی و توان نامی ژنراتور می‌باشند. ضریب  $D = \frac{\partial P_D}{\partial f}$  وابستگی بار به فرکانس را نشان می‌دهد.  $P_D$  و  $f$  نیز به ترتیب، توان مصرفی بار و فرکانس شبکه را نمایش می‌دهند. در تحلیل‌های مرسوم در مطالعات سیستم، وابستگی بار به فرکانس خطی فرض می‌شود [14]. در این مدل فرض شده است که توان مکانیکی توربین مستقل از سرعت آن است و تأثیر تغییر سرعت آن در تغییر عملکرد توربین از جمله توان مکانیکی در نظر گرفته نشده است.

با توجه به دیاگرام مذکور، تغییرات توان توربین را می‌توان از معادله (۲) به دست آورد.

$$\Delta P_T = G_T [G_H (\Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta f)] \quad (2)$$

همانطور که مشاهده می‌شود، توان خروجی توربین تابعی از تغییرات نقطه تنظیم توربین<sup>۷</sup> ( $\Delta P_{ref}$ ) و تغییرات دبی ورودی سیال حامل انرژی، متناسب با تغییر فرکانس بر اثر کارکرد گاورنر ( $\frac{1}{R} \Delta f$ ) می‌باشد. معمولاً، در حالت کنترل اتوماتیک،  $\Delta P_{ref}$  بدون تغییر می‌باشد. لذا، در حالت پایدار انتظار داریم که توان خروجی توربین فقط تابع میزان ضریب  $\frac{1}{R}$  گاورنر باشد. بنابراین، اگر فرض شود که سیستم توربین ژنراتور فاقد گاورنر است، انتظار می‌رود که توان خروجی توربین ثابت بماند. این در حالی است که در شرایط تغییر فرکانس نقطه کار توربین و بالطبع راندمان آن می‌تواند تغییر کند.

### ۳- نارسایی در حلقه ALFC

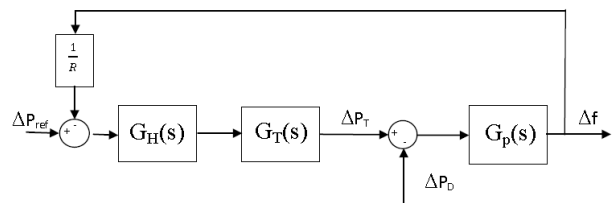
که در بخش قبل اشاره گردید، مدل ارائه شده بخش ۲، مدل پایه برای مطالعات مختلف سیستم‌های قدرت می‌باشد. با این حال و متناسب با هر مطالعه، بخش‌هایی به این مدل اضافه یا برخی از توابع انتقال آن با دقت بیشتری مدل‌سازی می‌گردند. با اینحال و علیرغم کثرت استفاده از این مدل، گاهی تناقضاتی در عملکرد سیستم‌های قدرت مشاهده می‌شود که نشان از آن دارد که این مدل ممکن است توانایی کامل توصیف برخی از حالت‌های خاص در مطالعات سیستم را نداشته باشد. به عنوان مثال، فرض کنید که یک ژنراتور یک بار اهمی را تغذیه می‌کند. بدیهی است که در این حالت  $D = \frac{\partial P_D}{\partial f} = 0$  می‌باشد. حال، اگر فرض کنیم که تغییر نقطه کار نداشته باشیم ( $\Delta P_{ref} = 0$ ) و حلقه کنترل سرعت توربین (ALFC) باز باشد ( $\frac{1}{R} = 0$ )، در این صورت، در ورودی توربین هیچ تغییری ایجاد نمی‌شود. لذا، با توجه به معادله (۲)، تغییرات توان خروجی توربین صفر

سبب بروز تناقضاتی در برخی از حالت‌های خاص می‌شود. از طرفی، کامل نبودن مدل و اغماض از برخی از ویژگی‌های بنیادی مدل مرسوم می‌تواند منجر به نارسایی در برخی از نتایج گردد. به همین دلیل، لازم است که مدل مرسوم توسعه یافته و به شکل دقیق اصلاح گردد.

در این مقاله و در بخش ۲، اصول کلی که بر مبنای آن رابطه تغییرات فرکانس با تغییرات توان مدل‌سازی می‌گردد و در تحقیقات و مقالات مورد استفاده قرار می‌گیرد، معرفی می‌گردند. سپس، رفتار فرکانس-توان توربین، به صورت اجمالی و بر مبنای تابع انتقال، توصیف می‌شود. در بخش ۳، بر اساس توصیف رایج از تابع انتقال، به بیان یک تناقض آشکار در این مدل تابع انتقال مرسوم پرداخته می‌شود. در بخش ۴، رفتار مکانیکی توربین‌ها در برابر افزایش بار و به دنبال آن اثر تغییر سرعت در توان خروجی واحدهای تولیدی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در بخش ۵، مدل توسعه یافته‌ای برای حلقه کنترل بار-فرکانس معرفی می‌گردد که بر اساس آن نارسایی مدل متداول برطرف شده باشد. کاربرد این مدل می‌تواند سبب بهبود و قابل اتکا بیشتر مطالعات در برخی زمینه‌ها از جمله نوسانات فرکانس کم در سیستم‌های قدرت گردد. بخش ۶ به تحلیل بیشتر این مدل می‌پردازد. در بخش ۷، تأثیر مدل توسعه یافته بر نتایج مطالعات سیستم‌های قدرت، به کمک شبیه‌سازی در نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت نشان داده شده است. بخش پایانی مقاله به جمع‌بندی و ارائه نتیجه می‌پردازد.

### ۲- معرفی حلقه ALFC

شکل (۱) بلوک دیاگرام حلقه کنترل توان-فرکانس را در یک واحد نیروگاهی نشان می‌دهد [14].



شکل (۱): بلوک دیاگرام حلقه کنترل توان-فرکانس یک واحد نیروگاهی

این بلوک دیاگرام تغییرات فرکانس سیستم را بر اثر تغییر بار  $\Delta P_D$  یا تغییر نقطه کار  $\Delta P_{ref}$  حول نقطه کار نشان می‌دهد. در این شکل، توابع انتقال به صورت  $G_H(s) = \frac{1}{T_H s + 1}$  و  $G_T(s) = \frac{1}{T_T s + 1}$  می‌باشند که به ترتیب تابع انتقال سیستم هیدرولیک والو توربین و تابع انتقال تغییر توان توربین ناشی از تغییر دبی سیال درونی آن است. در این توابع انتقال،  $T_H$  نشان‌دهنده ثابت زمانی باز شدن والو توربین و  $T_T$  ثابت زمانی توربین می‌باشند. رابطه ساده تغییر تنظیم والو توربین بر اثر عملکرد گاورنر توسط ضریب  $\frac{1}{R}$  بیان می‌گردد.

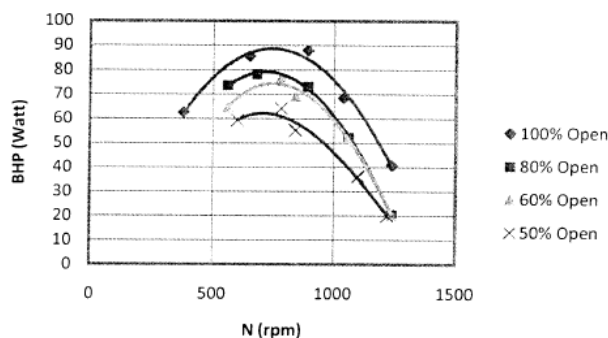
اساس قوانین پایه مربوطه، مثل اصل ضربه<sup>۸</sup> یا اصل عکس‌العمل<sup>۹</sup> وابستگی توان توربین به سرعت آن، بسادگی قابل اثبات است.

بعنوان مثال، بر اساس اصل ضربه، نیروی وارد بر یک جسم متحرک از رابطه (۵) بدست می‌آید [15].

$$F = \frac{\dot{m}}{g_c} (V_s - V_B) \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $F$  و  $\dot{m}$  به ترتیب نیرو و دبی جرم سیال می‌باشند.  $V_B$  و  $V_s$  سرعت سیال و سرعت جسم متحرک را نشان می‌دهند.  $g_c$  ضریب تبدیل می‌باشد که در سیستم SI برابر با  $1 \text{ kg.m/(N.s}^2\text{)}$  می‌باشد.

در شکل (۲) منحنی مشخصه توان-سرعت یک میکروتوربین آبی (توربین پلتون) دیده می‌شود. در این شکل، مشخصه توان-سرعت توربین در شرایط ارتفاع آب ثابت به ازای وضعیت والو توربین (کاملاً باز، ۸۰٪ باز، ۶۰٪ باز و ۵۰٪ باز) دیده می‌شود.



شکل (۲): منحنی توان-سرعت توربین پلتون در هد آب ثابت

در شکل (۲)، نیمه سمت چپ پیک منحنی‌ها منطقه کار ناپایدار و بخش سمت راست پیک منحنی‌ها منطقه کار پایدار توربین را نشان می‌دهد. در منطقه کار پایدار توربین، مشاهده می‌شود که توان توربین با کاهش سرعت، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در این ناحیه  $\frac{\Delta P}{\Delta f} < 0$  است.

#### ۴-۲- توربین‌های حرارتی

در توربین‌های حرارتی (مانند توربین بخار و توربین گاز) نیز، توان خروجی توربین با تغییر سرعت توربین تغییر می‌کند. با استفاده از قانون بقای انرژی می‌توان این تغییر را تفسیر نمود. براساس قانون بقای انرژی در حالت پایدار، در یک توربین حرارتی ایده‌آل داریم:

$$W_{in} = W_{mec} + W_{exh} \quad (6)$$

در رابطه (۶)،  $W_{in}$  انرژی سیال حامل انرژی (بخار آب یا گازهای حاصل از احتراق) و  $W_{exh}$  انرژی گازهای خروجی توربین و  $W_{mec}$  انرژی مکانیکی محور توربین می‌باشد. حال، رابطه تغییرات انرژی را می‌توان به صورت رابطه (۷) نوشت، بطوری‌که:

$$\Delta W_{in} = \Delta W_{mec} + \Delta W_{exh} \quad (7)$$

خواهد بود. حال اگر افزایش توان بار را داشته باشیم، عبارت دیگر اگر  $\Delta P_D > 0$  باشد، در حوزه فرکانس خواهیم داشت:

$$\Delta P_T - \Delta P_D = \frac{K_p}{T_p^{s+1}} \Delta f \quad (3)$$

با جایگذاری  $D = 0$  و  $\Delta P_T = 0$  و ساده کردن روابط در حوزه زمان خواهیم داشت:

$$-\Delta P_D = \frac{2H}{f^0} \frac{d}{dt} \Delta f \quad (4)$$

با توجه به منفی بودن طرف اول معادله فوق، باید هموار تغییرات فرکانس منفی داشته باشیم. این امر مستلزم این است که با اضافه شدن بار به سیستم، باید شاهد کاهش دائمی فرکانس باشیم. در حالی که، شواهد تجربی نشان می‌دهند که در صورت بروز چنین شرایطی ژنراتور در یک فرکانس کمتر به کار خود ادامه می‌دهد.

بدیهی است که در مسئله فوق تأمین انرژی بار اضافی نمی‌تواند از طریق انرژی جنبشی محور یا اثرات سیم‌پیچ‌های دمپر ژنراتور برقرار باشد. زیرا، انرژی جنبشی محور یا اثرات سیم‌پیچ‌های دمپر، تا زمانی تأمین کننده توان بار است که شاهد تغییر سرعت محور باشیم و این انرژی در حالت پایدار که سرعت ثابت می‌ماند، نمی‌تواند تأمین کننده توان مورد نیاز بار باشد. ضمناً، با توجه به قانون بقای انرژی می‌توان این موضوع را برای تغییرات بزرگ فرکانس و بالطبع معادلات غیرخطی سیستم نیز تعمیم داد.

می‌توان نتیجه گرفت که عدم تطبیق واقعیت با نتایج بدست آمده از مدل، می‌تواند ناشی از نارسایی موجود در مدل در نظر گرفته شده در معادلات متداول باشد. در این مقاله، روش دقیق‌تری برای مدل‌سازی حلقه کنترل بار-فرکانس نیروگاه‌ها ارائه می‌گردد.

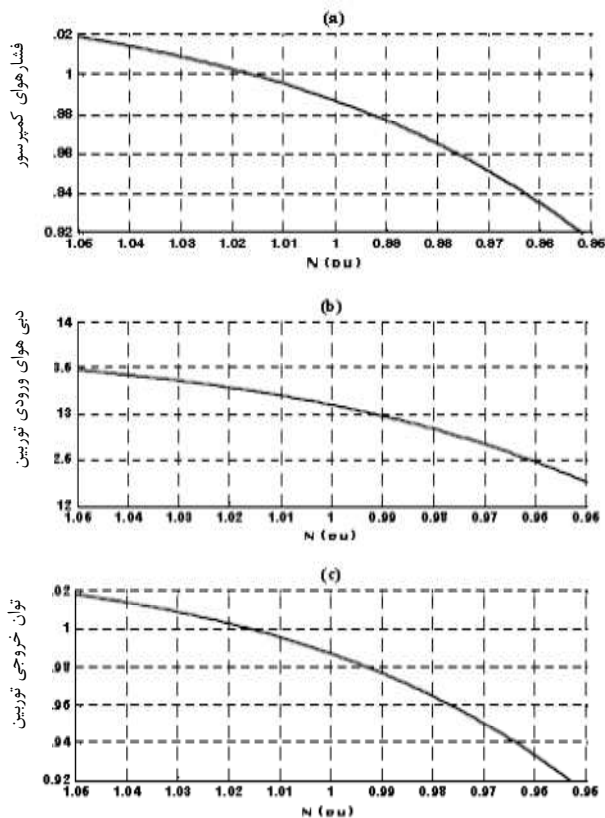
#### ۴- رفتار توان-سرعت توربین

سیستم‌های چرخاننده پایدار مکانیکی عموماً این ویژگی را دارند که با افزایش توان مقاوم محور، سرعت آنان کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، در حالت پایدار، در صورتیکه ورودی توربین ثابت فرض شود با افزایش نیروی مقاوم محور، سرعت کاهش و راندمان توربین افزایش می‌یابد و توان خروجی توربین افزایش می‌یابد تا بتواند بر توان مقاوم محور غلبه کند. لذا، توربین ضمن افزایش توان خود، در سرعت کمتری به کار خود ادامه می‌دهد. این ویژگی در اکثر چرخاننده‌های پایدار بصورت تجربی مشاهده می‌شود. در ادامه، در مورد این ویژگی توربین‌های متداول نیروگاه‌ها توضیحات بیشتری ارائه می‌گردد.

#### ۴-۱- توربین‌های آبی

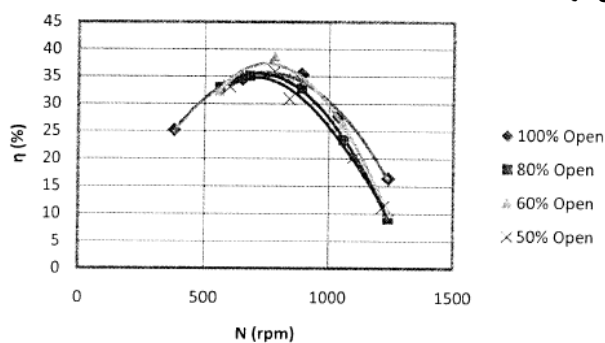
نیروگاه‌های آبی یکی از انواع مهم نیروگاه‌های شبکه‌های برق می‌باشند. توربین‌های متداول مورد استفاده در این نیروگاه‌ها، معمولاً توربین پلتون یا فرانسسیس می‌باشند. توربین پلتون یک توربین ضربه‌ای و توربین فرانسسیس یک توربین عکس‌العملی محسوب می‌شود. بر

کاهش و بواسطه تغییر راندمان توربین، توان خروجی توربین افزایش می‌یابد.



شکل (۳): مشخصه‌های مختلف توربین گازی بر اثر تغییر سرعت توربین (کلیه مقادیر بر حسب پریونیت هستند)  
(a) فشار هوای کمپرسور (b) دبی هوای ورودی توربین (c) توان تولیدی توربین

در شکل (۴)، تغییرات راندمان توربین پلتون بر اثر تغییر بار دیده می‌شود.



شکل (۴): منحنی تغییرات راندمان یک توربین پلتون بر اثر تغییر سرعت محور در هد آب ثابت

با اینحال علی‌رغم اینکه منحنی شکل‌های ۲ و ۳ و ۴ تأثیرپذیری راندمان توربویین-ژنراتورها را نسبت به تغییر سرعت چرخش بخوبی

در حالتی که دبی سیال خروجی به سرعت محور بستگی نداشته باشد (مانند توربین‌های بخار)،  $\Delta W_{in} = 0$  خواهد بود. در این صورت، اگر توان مکانیکی محور افزایش یابد، براساس رابطه (۷) نتیجه می‌شود که انرژی گازهای خروجی توربین کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه انرژی گازهای خروجی به دما و فشار آن بستگی دارد، بنابراین، در صورت افزایش توان مقاوم محور و ثابت بودن دبی گازهای ورودی توربین، سرعت محور کاهش، انرژی مکانیکی آن افزایش و انرژی گازهای خروجی آن کاهش می‌یابد.

در حالت گذرا، معادله (۷) به معادله (۸) تبدیل می‌شود.

$$\Delta W_{in} = \Delta W_{mec} + \Delta W_{exh} + \Delta W_{inter} \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $\Delta W_{inter}$  تغییرات انرژی گازهای داخل توربین می‌باشد که در حالت پایدار به سمت صفر میل خواهد کرد. این رابطه نشان می‌دهد که وابستگی توان مکانیکی به سرعت دارای یک دینامیک است که می‌تواند بر رفتار گذرای سیستم تأثیر بگذارد.

در نیروگاه‌های گازی که کمپرسور و توربین بر روی یک محور قرار دارند با تغییر سرعت محور توربین، دبی هوای خروجی کمپرسور (هوای ورودی توربین) تغییر می‌کند. این تغییر باعث تغییر فرآیند احتراق می‌شود. با کاهش سرعت محور توربین، انرژی گازهای ورودی به توربین کاهش می‌یابد. لذا، فرض  $\Delta W_{in} = 0$  در توربین‌های گازی صادق نیست. در این توربین‌ها با افزایش سرعت توربین، فشار و دبی هوای ورودی توربین افزایش می‌یابد. این امر مستلزم افزایش انرژی سیال ورودی می‌باشد. بنابراین، در عمل با افزایش سرعت توربین، توان خروجی توربین نیز افزایش می‌یابد. این رفتار توربین‌های گازی با رفتار سایر توربین‌ها متفاوت است. به عبارت دیگر، در حالت پایدار  $\frac{\Delta P}{\Delta f} > 0$  خواهد بود. مشخصه‌های فشار هوا و دبی هوای خروجی کمپرسور و توان خروجی برای یک توربین در شکل (۳) مشاهده می‌شود [4].

در حالت گذرا، رفتار این توربین‌ها کاملاً متغیر است. در صورت افزایش سرعت محور، در لحظات اولیه، شاهد کاهش توان توربین و پس از گذشت زمان لازم و افزایش هوای خروجی توربین، شاهد افزایش توان آن خواهیم بود.

### ۴-۳- ضریب دمپینگ توربین

میزان افزایش توان تولیدی توربین بر اثر کاهش سرعت محور پدیده قابل ملاحظه‌ای است که بیشتر در زمینه مطالعات مکانیکی سیستم به آن پرداخته شده است که از آن جمله می‌توان به [2] اشاره نمود. نسبت  $\frac{\Delta P}{\Delta f}$  در مطالعات توربین‌ها با ضریب D نشان داده می‌شود و به آن ضریب دمپینگ توربین اطلاق می‌گردد. علت این نام‌گذاری تأثیر مثبت این ضریب در دمپینگ نوسانات محور توربین می‌باشد.

بر اساس این ویژگی توربین‌ها، می‌توان گفت که در صورت ثابت ماندن توان ورودی توربین، با افزایش بار مقاوم محور، سرعت توربین

نشان می دهند، تاکنون در مطالعات سیستم های قدرت به این مسئله توجه کافی نشده است. طبیعتاً این اثر در مدل سازی ها لحاظ گردیده است و یا اثر آن بطور توأم در ضریب  $D$ ، که تغییرات بار در اثر فرکانس را نشان می دهد، لحاظ شده است. این در حالی است که عدم در نظر گرفتن این اثرات در مدل سازی و یا لحاظ نمودن اثر آن در ضریب  $D$ ، می تواند سبب مشاهده تناقضاتی در رابطه با عملکرد توربین-ژنراتورها گردد که اساساً با مدل سازی های معمول قابل توجیه نمی باشد. به عبارت دیگر، عدم توجه به این ویژگی ممکن است منجر به برخی نتیجه گیری های ناصحیح در محاسبات گردد.

## ۵- مدل پیشنهادی

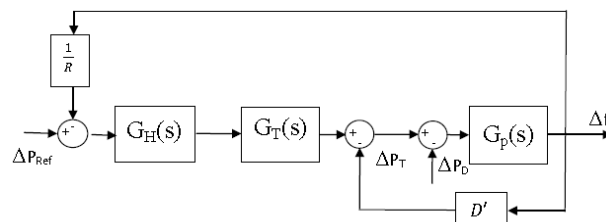
در این مقاله، با توجه به نتایج بدست آمده در بخش ۴ مدل مرسوم توسعه داده شده و مدلسازی توربین ژنراتور بصورت دقیق تری اصلاح گردیده است. همچنانکه مشاهده می شود، با توجه به مفهوم ضریب دمینگ توربین، رابطه تغییرات توان تولیدی توربین نسبت به سرعت محور، (به شرط ثابت بودن سیستم ورودی توربین) یک منحنی است. این منحنی با توجه به نوع توربین و نقطه کار آن، می تواند شکل های متفاوتی داشته باشد. با اینحال، در صورتیکه تغییرات سرعت توربین ناچیز باشد، با دقت زیاد می توان این تغییرات را خطی فرض نمود. لذا، داریم:

$$D' = \frac{\partial P_T}{\partial f} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، برای نمایش ضریب دمینگ توربین از  $D'$  استفاده شده است تا با ضریب وابستگی بار-فرکانس که در مطالعات مرسوم با ضریب  $D$  نمایش داده می شود، متمایز باشد. همچنانکه مشاهده شد، این ضریب در حالت پایدار معمولاً منفی است. یعنی، با افزایش فرکانس توان خروجی کاهش می یابد. بنابراین، در معادله (۲) که تغییرات توان توربین را نشان می دهد، باید تغییرات جزئی اعمال گردد. برای این منظور می توان رابطه (۱) را بصورت رابطه (۱۰) اصلاح نمود.

$$\Delta P_T = G_T \left[ G_H \left( \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta f \right) \right] - D' \Delta f \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، نقص معادلات مربوط به سیستم توربین-ژنراتور اصلاح شده است و در نتیجه می توان مدل پیشنهادی را مطابق شکل (۵) اصلاح نمود.



شکل (۵): مدل اصلاح شده حلقه ALFC توربین-ژنراتور یک واحد نیروگاهی

مدل پیشنهادی فوق با صرف نظر کردن از دینامیک تغییرات توان تولیدی توربین بر اثر تغییر سرعت محور پیشنهاد داده شده است. با این

حال، می توان برای مطالعات دقیق تر این دینامیک را نیز در سیستم لحاظ نمود. بدین منظور، باید برای آن تابع انتقال مناسب مثل  $F_D(s)$  به جای ضریب  $D'$  پیشنهاد گردد. در ساده ترین حالت، می توان از یک تابع انتقال مرتبه اول برای  $F_D(s)$  استفاده نمود. این مدل در هیچیک از مدل های ارائه شده برای توربین مورد توجه قرار نگرفته است. در مطالعات مربوط به دینامیک سیستم، ممکن است این مدل مناسب تر باشد. در اینجا، فقط به این نکته اشاره می شود که در صورت استفاده از مدل مرتبه اول برای رفتار توربین، ثابت زمانی های آن از ثابت زمانی های مربوط به سیستم مکانیکی کوچکتر است. این مسئله می تواند در رفتار دینامیکی توربین-ژنراتور تأثیر قابل ملاحظه ای بگذارد. اگرچه در مطالعات مربوط به نوسانات فرکانس پایین، برای توربین مدل های بسیار دقیقی ارائه می شود [16]. با این حال، از این رفتار مهم و اساسی مربوط به توربین ها در مدل های مورد استفاده چشم پوشی شده است.

## ۶- ملاحظات مدل ارائه شده

از آنجایی که این مدل تاکنون بطور کامل در سیستم های قدرت مورد بررسی قرار نگرفته است، لازم است در مورد برخی ابهامات توضیح داده شود.

در صورتیکه مدل رفتار توربین با ضریب ثابت  $D'$  اصلاح شود، اگر تابع انتقال پیشنهادی ساده گردد، مشاهده می شود که ضریب  $D$  و ضریب  $D'$  با یکدیگر جمع می گردند. به عبارت دیگر نقشی که این ضریب در رفتار توربین-ژنراتور ایفا می کند در اکثر مواقع شبیه نقش ضریب وابستگی بار-فرکانس شبکه است. به همین دلیل، در بسیاری از مطالعات انجام شده، علیرغم اینکه این رفتار توربین مورد توجه قرار نگرفته است، مطالعات به نتایج درست و صحیحی منجر می گردد. با این حال، باید به این مسئله توجه گردد که هر چند در بسیاری از مطالعات، عدم توجه به نقش ضریب  $D'$  ممکن است تأثیری مستقیمی روی نتایج نداشته باشد، ولی واضح است که این ضریب باید به صورت مستقل و مجزا ارزیابی و در مدل لحاظ گردد. زیرا ضریب  $D$  از مشخصات شبکه است و تابع نوع بار و آرایش ژنراتورهای شبکه بوده و اساساً برای یک شبکه تعریف می شود. این در حالی است که، ضریب  $D'$  از ویژگی های یک توربین بوده و برای هر توربین بطور مستقل تعیین می گردد. به عبارت دیگر از آنجایی که در حلقه کنترل بار-فرکانس توربین-ژنراتور هر دو فیزیک توصیف شده (تغییرات توان فرکانس) وجود دارند، نسبت به فرکانس و تغییر توان توربین نسبت به فرکانس) وجود دارند، لازم است این دو رفتار بطور مجزا دیده شوند تا از بروز تناقضات در برخی تحلیل ها جلوگیری شود.

از آنجایی که شبکه های قدرت در فرکانس تقریباً ثابت بهره برداری می شوند، بنابراین، تغییر توان توربین ناشی از تغییر سرعت آن ناچیز است و لذا ممکن است به نظر آید ساده سازی مدل و حذف  $D'$  از مدل سازی، تأثیری بر نتایج مطالعات نخواهد داشت. این در حالی

است که، ضریب  $D'$  در توربین های مختلف متفاوت می باشد و توان تولید شده هر توربین با تغییر فرکانس شبکه به مقدار خاص خود تغییر می کند. بنابراین، این تفاوت می تواند آثار گوناگونی بر روی انواع مختلف ژنراتورها داشته باشد. علاوه بر آن، اندازه این پارامتر در حلقه کنترل بار-فرکانس برخی از ژنراتورها نیز به اندازه های است که در بسیاری از مطالعات نمی توان از آن صرف نظر کرد. اگر مقدار  $D'$  بر حسب پریونیت و بر مبنای مقادیر نامی ژنراتور محاسبه شود، معمولاً مقدار آن در توربین های مختلف و متناسب با تعداد قطب های ژنراتور در محدوده  $0.05 - 0.2 \text{ P.U. (watt)/Hz}$  قرار دارد. مشاهده می شود که مقدار این ضریب به اندازه کافی بزرگ است. لذا، حذف این پارامتر ممکن است خطای قابل ملاحظه در نتایج محاسبات بوجود آورد.

این نکته نیز قابل ذکر است که با وجود این که کاهش سرعت توربین باعث افزایش راندمان آن و بدنبال آن افزایش توان تولیدی آن می گردد، ولی طراحان توربین، آن را بگونه ای طراحی نمی کنند که در راندمان ماکزیمم کار کند زیرا، در طراحی سیستم ها، معمولاً سیستم در نقطه بهترین عملکرد طراحی می شود و این لزوماً به معنی طراحی در نقطه ماکزیمم راندمان نیست. بعنوان مثال، در توربین های بخار می توان با کاهش سرعت محور توان خروجی توربین را افزایش داد. این در حالی است که، این شرایط می تواند سبب ایجاد ذرات ریز آب در توربین و خوردگی پره های توربین گردد.

## ۷- تأثیر مدل پیشنهادی در تحلیل مسائل سیستم های قدرت

همچنانکه مشاهده شد، جهت امکان تحلیل دقیق تر سیستم های قدرت، لازم است به حلقه کنترل اتوماتیک بار-فرکانس یک شاخه اضافه گردد. مطابق طرح پیشنهادی این شاخه موازی حلقه گاورنر توربین می باشد. بطور کلی تأثیر حلقه گاورنر در اندازه توان خروجی بزرگ است و لذا شاخه پیشنهادی موازی در صورتی که زمان کافی برای اعمال اثر گاورنر وجود داشته باشد، تأثیر زیادی نخواهد داشت. بنابراین، حذف این شاخه با خطای قابل ملاحظه همراه نخواهد بود. با این حال، در زمان های کوتاه و قبل از بروز رفتار گاورنر، این شاخه نقش قابل ملاحظه ای در رفتار توربین و ژنراتور خواهد داشت. می توان رفتار شبکه را در برخی از موارد از جمله در صورت افزایش یا کاهش ناگهانی بار و همچنین در طول مدت بازیابی شبکه، متأثر از این شاخه دانست. لذا، لازم است این مسائل و یا مشابه آنها را با این مدل تحلیل گردد.

یکی از مسائل مهم در مطالعات سیستم های قدرت، که استفاده از مدل ارائه شده می تواند در نتایج آن تأثیر داشته باشد، مسئله نوسانات فرکانس پایین است. این پدیده که می تواند اثرات نامطلوبی بر سیستم های قدرت داشته باشد، امروزه مورد توجه محققین قرار دارد و مطالعات متنوعی در مورد آن انجام می شود. در مطالعات مرسوم در این زمینه اساساً گشتاور محور ثابت فرض می شود. در برخی از مطالعات

نیز سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور نیز مدلسازی می شود. اما به علت بزرگ بودن ثابت زمانی سیستم مکانیکی تأثیر آن قابل اغماض است. به همین دلیل، استفاده از پایدارسازهای مکانیکی در میرا کردن نوسانات مکانیکی بوجود آمده بی تأثیر یا کم تأثیر است. این در حالی است که بر اساس مدل توسعه یافته و بررسی آن می توان نتیجه گرفت که با در نظر گرفتن اثر ضریب دمپینگ توربین، فرض ثابت ماندن گشتاور محور فرض صحیحی نیست و عملاً با تغییر سرعت محور ژنراتور، توان مکانیکی آن تغییر می کند. برای نشان دادن این تأثیر کافی است با شبیه سازی مناسب اثر این پارامتر را در رفتار ژنراتور بررسی کرد.

به منظور ارزیابی تأثیر ضریب دمپینگ توربین، از شبیه سازی یک سیستم چند ماشینه که در آن از مدل معرفی شده در [17] استفاده شده است، بهره گرفته می شود. این مدل شامل چهار ماشین سنکرون مشابه است که بصورت متقارن نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند و دو بار بزرگ را تغذیه می کنند. مشخصات و پارامترهای مربوط به سیستم در ضمیمه این مقاله مشاهده می شود. نقطه کار سیستم بصورتی تعیین گردیده است که دو قطب  $0.12 \pm j3.47$  در سمت راست محور موهومی دارد و سیستم ناپایدار است. با بررسی ضریب تأثیر ژنراتورها، مشاهده می شود که ژنراتور واحد ۳ دارای ضریب تأثیر بزرگتری است و بنابراین، با طراحی یک PSS برای این واحد می توان شبکه را پایدار نمود. در صورت استفاده از این PSS، مشاهده می شود که قطب های ناپایدار سیستم جابجا شده و مقدار آنها به  $0.35 \pm j3.59$  تغییر خواهند یافت.

حال اگر فقط ضریب دمپینگ توربین واحد ۳ در محاسبات اعمال گردد (بعنوان مثال یک توربین با ضریب دمپینگ  $0.02 \text{ P.U. (MW)/Hz}$ )، مشاهده می شود که قطب های ناپایدار سیستم تغییر کرده و مقادیر آنها به  $0.13 \pm j3.41$  تغییر خواهند یافت. چنانچه در این حالت PSS طراحی شده قبلی اعمال گردد، مشاهده می شود که قطب ها به مقدار زیادی به سمت چپ جابجا شده و مقادیر آنها برابر  $0.70 \pm j3.41$  خواهند شد.

از آنجایی که ضریب دمپینگ توربین ها ممکن است منفی گردد (بصورت پایدار یا کوتاه مدت)، اگر توربین واحد ۳ دارای ضریب دمپینگ منفی باشد (بعنوان مثال یک توربین با ضریب دمپینگ  $0.02 \text{ P.U. (MW)/Hz}$ )، مشاهده می شود که با وجود استفاده از PSS، قطب های سیستم برابر با  $0.01 \pm j3.74$  خواهند شد که نشان می دهد که دمپینگ سیستم از بین رفته است و سیستم رفتار ناپایدار از خود نشان خواهد داد.

## ۸- نتیجه گیری

در مدل مرسوم حلقه کنترل فرکانس در مطالعات مربوط به سیستم توربین ژنراتور، برخی از رفتارهای سیستم به صورت کامل مدل نمی گردد. لذا، در مواردی ممکن است شاهد تناقض در نتایج باشیم. در

امپدانس و ادمیتانس واحد طول هر خط انتقال:

$$R_L=0.0001 \text{ p.u/km}$$

$$X_L=0.001 \text{ p.u/km}$$

$$B_L=0.00175 \text{ p.u/km}$$

## مراجع

- [1] IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Sream and Hydro Turbine In Power System", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, No. 6, pp. 1904-1915, 1973.
- [2] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies," Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies", Transactions on Power Systems, Vol. 7, NO. 1, February 1992
- [3] Yee S. K., Milanovic J. V. and Hughes F. M., "Overview and Comparative Analysis of Gas Turbine Models for System Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 1, February 2008.
- [4] Shalan H. E. M. A., Moustafa Hassan M. A. and Bahgat A. B. G., "Comparative Study On Modeling Of Gas Turbines In Combined Cycle Power Plants", Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010.
- [5] Heffron, W. G. and Phillips, R. A., "Effect of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators", AIEE Trans. PAS, Vol. 71, pp. 692-697, 1952.
- [6] Cohn, N., "Some aspects of tie-line bias control on interconnected power systems", Amer. Inst. Elect. Eng. Trans., vol. 75, pp. 1415-1436, Feb. 1957.
- [7] de Mello, F. P. and Concordia, C., "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by excitation Control", IEEE Trans. PAS, Vol. 88, No. 4, pp. 316-329, 1969.
- [8] de Mello, F. P. and Laskowski, T. F., "Concepts of Power System Dynamic Stability", IEEE Trans. PAS, Vol. 94, No. 3, pp. 827-833, 1975.
- [9] Elgerd, O. I. and Fosha, C., "Optimum megawatt frequency control of multi-area electric energy systems", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-89, no. 4, pp. 556-563, Apr. 1970.
- [10] Yu, Y. N., Electric Power System Dynamics: Academic Press, New York, 1983.
- [11] Ibraheem, P. Kumar, and Kothari, D. P., "Recent Philosophies of Automatic Generation Control Strategies in Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, NO. 1, February 2005.
- [12] Shanechi, H. M. and Oloomi, M. B., "A Generalized Heffron-Phillips Model for Multi-Machine Power Systems with Voltage and Frequency Dependent Loads", Electric Power Components and Systems, 29:389-404, 2001.
- [13] Kao, Wen-Shiow, "The Effect of Load Models on Unstable Low-Frequency Oscillation Damping in Taipower System Experience w/wo Power System Stabilizers", IEEE Trans. Power on Power Systems, Vol. 16, NO. 3, August 2001.
- [14] Elgerd, O. I., Electric Energy System Theory: An Introduction, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [15] El-wakill, M. M., Powerplant Technology: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [16] Zhong-xu, H., Ze-lei, Z., Xin-shou, T. and Fang, L., "Analysis and Simulation Research on Power System

مدل، عوامل مهم تأثیرگذار مانند اثر گاور نر و سیستم هیدرولیک مدل شده اند. با این حال، تأثیر دو عامل مجزا و با تأثیر نسبتاً مشابه بمنظور ساده‌سازی، با هم در نظر گرفته شده‌اند. این دو عاملشاملتأثیر تغییر توان شبکه بر اثر تغییر فرکانس و تأثیر تغییر توان توربین بر اثر تغییر سرعت محور می‌باشند. این در حالی است که، با توجه به تغییر توان توربین ناشی از تغییر سرعت آن، لازم است این رفتارها در بلوک دیاگرام حلقه کنترل فرکانس توربین-ژنراتور بصورت صریح و مجزا نشان داده شوند. در این مقاله، مدل توسعه یافته دقیق تری برای ژنراتورها در سیستم کنترل بار-فرکانس معرفی گردیده است. با بکارگیری مدل جدید و بکمک ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داده شد که مدل معرفی شده می‌تواند برخی از تناقضات بوجود آمده در مدل‌های مرسوم را برطرف نماید. علاوه بر آن، مدل ارائه شده یک ویژگی اساسی سیستم مکانیکی توربین ژنراتور را که می‌تواند در پیدایش نوسانات فرکانس کم ژنراتور تأثیر بسزایی داشته باشد، در نظر می‌گیرد. در این مدل، همانند سایر مقالات از ضریب  $D$  برای نمایش تغییر توان شبکه بر اثر تغییر فرکانس استفاده شده است. با این حال برای لحاظ نمودن تأثیر و به علت مغایرت مفهومی که بین ضریب دمپینگ توربین و ضریب وابستگی بار-فرکانس شبکه وجود دارد، لازم است برای این ویژگی از یک علامت اختصاری دیگر استفاده شود. در این مقاله وابستگی توان توربین به سرعت آن با ضریب  $D'$  استفاده شده است.

## پیوست

پارامترهای سیستم مورد استفاده برای شبیه‌سازی انجام شده در بخش ۷ مقاله، از [17] استخراج شده و مهم‌ترین پارامترهای آن عبارتند از:

الف) مشخصات ژنراتورها

$$R_a=0.0025 \quad X_d=1.8 \quad X_q=1.7 \quad X'_d=0.3 \quad X'_q=0.55$$

$$T'_{d0}=8 \quad T'_{q0}=0.4 \quad K_A=200 \quad T_A=0.01$$

$$H_g=6.5 \quad X_T=0.15 \text{ p.u}$$

$$P_{g1}=P_{g2}=P_{g4}=700 \text{ MW} \quad P_{g3}=719 \text{ MW}$$

$$V_{g1}=V_{g3}=1.01 \text{ p.u} \quad V_{g2}=V_{g4}=1.03 \text{ p.u}$$

ب) مشخصات بارها

$$P_{L1}=967 \text{ MW} \quad Q_{L1}=100 \text{ MVAR}$$

$$P_{L2}=1767 \text{ MW} \quad Q_{L2}=100 \text{ MVAR}$$

$L_1$  به شین ۳ و  $L_2$  به شین ۵ متصل است.

ج) مشخصات خط‌های انتقال

جدول (۱): مشخصات خطوط انتقال

شماره خط	شین ابتدایی	شین انتهایی	طول خط	تعداد مدار
۱	۱	۲	۲۵	۱
۲	۲	۳	۱۰	۱
۳	۳	۴	۱۱۰	۲
۴	۴	۵	۱۱۰	۲
۵	۵	۶	۱۰	۱
۶	۶	۷	۲۵	۱



- Low Frequency", Second International Conference on Computer Modeling and Simulation, 2010.
- [17] Xu X., Mathur R.M., Jian-g J., Rogers G.J., and Kundur P., "Modeling of Generators and Their Controls in Power System Simulations Using Singular Perturbations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, February 1998.

## زیر نویس ها

---

- <sup>1</sup>Automatic Load Frequency Control  
<sup>2</sup>Heffron  
<sup>3</sup>Plhilips  
<sup>4</sup>Power System Stabilizer  
<sup>5</sup>Load frequency dependency  
<sup>6</sup>Per-unit inertia constant  
<sup>7</sup>Set point  
<sup>8</sup>The Impulse Principle  
<sup>9</sup>The Reaction Principle  
<sup>10</sup>Participation Factor

