توسعه مدل حلقه کنترل بار– فرکانس نیروگاه‌ها با در نظرگرفتن ضریب دمپینگ توربین

جعفر عبادی[۱] محمدحسین جاویدی دشت بیاض[۲] ناصر پریز[۳]

۱- مربی- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد-مشهد- ایران
ebadi@um.ac.ir
۲- استاد- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد-مشهد- ایران
h-javidi@um.ac.ir
۳- دانشیار- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد-مشهد- ایران
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-سازی‌های 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 برروی 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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

۱- مقدمه

یک سیستم قدرت متشکل از اجزاء مختلف می‌باشد. محاسبات و تحلیل یک سیستم قدرت بدون مدل‌سازی اجزاء مختلف این سیستم امکان‌پذیر نمی‌باشد. گرچه برای برخی از مطالعات استفاده از مدلهای ساده می‌تواند به نتایج قابل قبولی منجر گردد، با این‌حال، تحلیل سیستم‌های قدرت در بسیاری از موارد بدون مدل‌سازی دقیق اجزاء آن امکان‌پذیر و قابل اعتماد نمی‌باشد. از جمله این موارد می‌توان به مدل-سازی ژنراتورهای سنکرون و توربین‌های نیروگاهی در شرایط تغییرات فرکانس اشاره نمود.

در مدل‌سازی ژنراتورها به منظور بررسی تأثیر تغییرات فرکانس به این نکته باید توجه نمود که در چنین شرایطی، رفتار ژنراتورها علاوه بر ویژگی‌های الکتریکی اجزاء آن شامل مدار تحریک، سیم‌پیچ آرمیچر و تأثیرات متقابل آنها بر یکدیگر، از ویژگی‌های مکانیکی توربین چرخاننده خود نیز تأثیر می‌پذیرد. به دلیل این وابستگی متقابل بین اجزاء الکتریکی و مکانیکی، تقریب‌های در نظر گرفته شده در مدل‌سازی ژنراتورها می‌تواند تحلیل‌ها و نتایج مطالعات را غیرقابل اتکا نماید.

در مدل‌سازی 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 مدل‌سازی ژنراتور و تحلیل رفتار آن بطور عمده توسط متخصصین رشته برق صورت گرفته است. از این جهت، بنظر می‌رسد که این مدل‌سازی مستقل، سبب گردیده است که در ارائه مدل ترکیبی به اثرات ناشی از تقریب‌های در نظر گرفته شده بر رفتار این مجموعه توجه جدی صورت گرفته نشده باشد. در این مقاله، ضمن توجه به این رفتار، مدل توسعه یافته‌ای برای حلقه کنترل بار-فرکانس نیروگاه‌ها در نظر گرفته شده است و سپس با مدل‌سازی و بررسی دقیق‌تر نشان داده شده است که عدم توجه به ساده‌سازی‌ها در مدل‌سازی ممکن است سبب غیرقابل اتکا بودن نتایج مطالعات گردد.

حلقه کنترل اتوماتیک بار-فرکانس[1] (ALFC) مدل رایجی است که برای مدل‌سازی تغییرات فرکانس ژنراتور در مسائل مختلف سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. 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 نیروگاه‌ها محسوب می شود. این مدل، علی‌رغم سادگی، بسیاری از نیازهای اساسی را برآورده می‌سازد.با این‌حال، می توان، در صورت نیاز، مدل دقیق‌تری برای هریک از اجزاء آن بدست آورد.

در زمینه مدل‌سازی توربین و تحلیل رفتار آن با توجه به نوع توربین مدل‌های مختلفی ارائه شده است. در [1] مدل‌های ساده و اساسی برای توربین‌های آبی و بخار ارائه شده است. در این مدل‌سازی رفتار اساسی سیستم مکانیکی و اثرات گاورنر و اصطکاک در رفتار توربین مدل شده است. برای توربین های آبی مدل‌های کامل‌تری در [2] ارائه شده است .در این مقاله، مسائل مرتبط با توربین‌های آبی از جمله اثرات الاستیسته آب، اصطکاک لوله، اثرات نازل‌ها و انواع گاورنرها مدل شده‌اند. در [3] مدل‌های مختلف برای توربین‌های‌گازی ارائه شده‌اند. 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]، مدل‌سازی برای واحدهای سیکل ترکیبی مورد توجه گرفته است.

برای مدل‌سازی رفتار الکتریکی ژنراتور سنکرون و تأثیر رفتار مکانیکی محور بر رفتار ژنراتور سنکرون،در سال ۱۹۵۲ هفرون[2] و فیلیپس[3] مدل خطی ساده برای یک ماشین سنکرون متصل به باس بی‌نهایت و یک بار امپدانسی محلی ارائه دادند [5]. بعدها، این مدل بصورت گسترده در مطالعات سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفت. اعمال ایده‌های کنترل در سیستم‌های قدرت[6]، تأثیر رفتار سیستم تحریک بر پایداری سیستم قدرت[7]، اصول پایداری دینامیکی در سیستم‌های قدرت [8]، کنترل فرکانس در یک شبکه با دو ناحیه[9]، تعمیم مدل به سیستم چند ماشینه و طراحی پایدارسازهای سیستم قدرت (PSS[4]) بر اساس این مدل پیشنهادی[10] انجام گردید. در [11]، مجموعه‌ای از مطالعات سیستم‌های 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 سیستم‌های قدرت می‌باشد و امروزه در بسیاری از مطالعات سیستم‌های قدرت از آن استفاده می‌شود.

در مطالعات متداول امروز در سیستم‌های قدرت، بر اساس مدل ساده، توان توربین منحصراً بصورت تابعی از سیستم کنترل اتوماتیک توربین (گاورنر) و نقطه تنظیم سیستم نشان داده می‌شود. 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 صرف‌نظر شده است [2].

هنگام بررسی اثرات تغییر فرکانس در سیستم‌های قدرت، این تغییرات با لحاظ نمودن پارامتر D، که وابستگی بار به فرکانس را نشان می‌دهد، در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود و از آن به عنوان ضریب وابستگی بار به فرکانس[5] نام برده می‌شود. این ضریب تغییر توان مصرفی شبکه در اثر تغییر فرکانس را نشان می‌دهد. بر همین اساس محاسبات مختلفی برای تعیین وابستگی بار به فرکانس و ولتاژ انجام گرفته است[12,13]. با این حال، در مدل‌سازی، وابستگی توان خروجی توربین به فرکانس صرف‌نظر شده است.

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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012

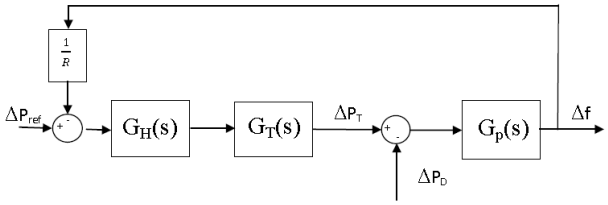
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

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 توربین ها در برابر افزایش بار وبه دنبال آن اثر تغییر سرعت در توان خروجی واحدهای تولیدی مورد تحلیل قرار می-گیرد. 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 ΔP_D یا تغییر نقطه کار ΔP_{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 گاور نر توسط ضریب $\frac{1}{R}$ بیان می‌گردد.

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

$$G_P(s)=\frac{K_p}{T_p\,s+1}=\frac{1}{K\,s+D} \qquad (۱)$$

در این تابع انتقال، $K_p=\frac{1}{D}$ و $T_p=\frac{2H}{f^0D}$ یا $K=\frac{2H}{f^0}$ می‌باشد. پارامتر $H=\frac{W^0_{kin}}{P_n}$، ثابت اینرسی محور بر حسب پریونیت[۶] می‌باشد. W^0_{kin} و P_n 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 تحلیل های 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.

$$\Delta P_T=G_T[G_H\left(\Delta P_{ref}-\frac{1}{R}\Delta f\right)] \qquad (۲)$$

همانطور که مشاهده می‌شود، توان خروجی توربین تابعی از تغییرات نقطه تنظیم توربین[۷] (ΔP_{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،ΔP_{ref} بدون تغییر می-باشد. 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، بخش هایی 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 سیستم های 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 نمی-شود. لذا، با توجه به معادله (۲)، تغییرات توان خروجی توربین صفر

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

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

$$\Delta P_T - \Delta P_D = \frac{K_p}{T_p s+1}\,\Delta f \qquad (۳)$$

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

$$-\Delta P_D = \frac{2H}{f^0}\frac{d}{dt}\Delta f \qquad (۴)$$

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 سیم پیچ های 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

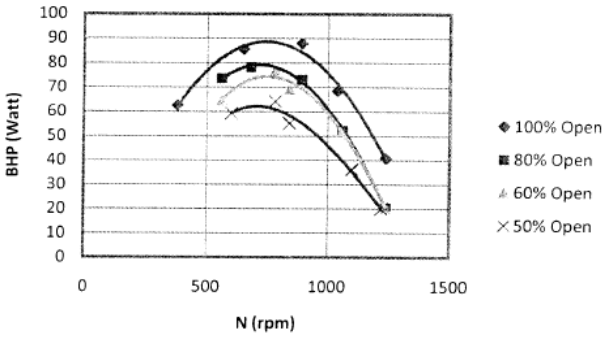
نیروگاه‌های آبی یکی از انواع مهم نیروگاه‌های شبکه‌های برق می‌باشند. توربین‌های متداول مورداستفاده در این نیروگاه‌ها، معمولاً توربین پلتون یا فرانسیس می باشند. توربین پلتون یک توربین ضربه‌ای و وتوربین فرانسیس یک توربین عکس‌العملی محسوب می شود. بر اساس قوانین پایه مربوطه، مثل اصل ضربه[8] یا اصل عکس‌العمل[9] 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].

$$F = \frac{\dot{m}}{g_c}(V_s - V_B) \qquad (۵)$$

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

$$W_{in} = W_{mec} + W_{exh} \qquad (۶)$$

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 می باشد. حال، رابطه تغییرات انرژی را می‌توان به صورت رابطه (۷) نوشت، بطوری‌که:

$$\Delta W_{in} = \Delta W_{mec} + \Delta W_{exh} \qquad (۷)$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

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.

$$\Delta W_{in} = \Delta W_{mec} + \Delta W_{exh} + \Delta W_{inter} \qquad (۸)$$

در رابطه (۸)، ΔW_{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.

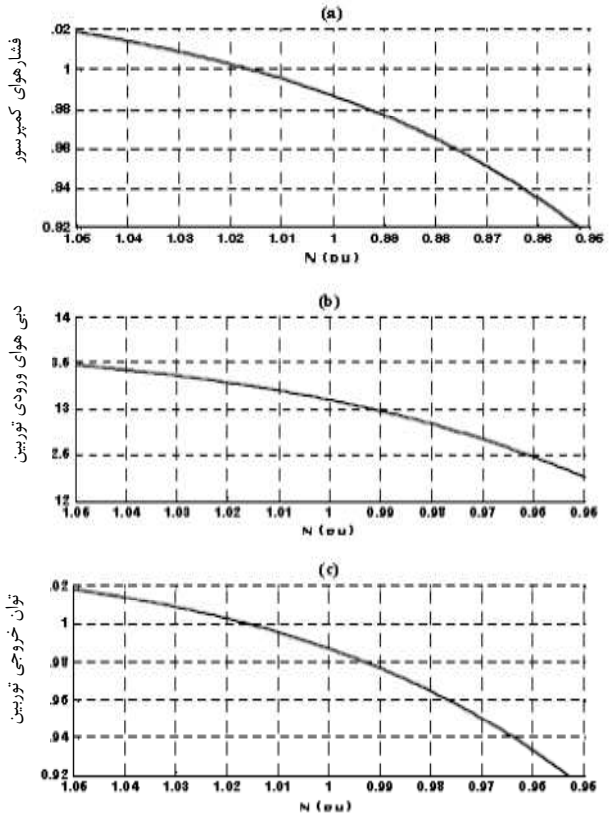
در نیروگاه‌های گازی که کمپرسور و توربین بر روی یک محور قرار دارند با تغییر سرعت محور توربین، دبی هوای خروجی کمپرسور (هوای ورودی توربین) تغییر می‌کند. این تغییر باعث تغییر فرآیند احتراق می‌شود. با کاهش سرعت محور توربین، انرژی گازهای ورودی به توربین کاهش می‌یابد. لذا، فرض $\Delta W_{in} = 0$ در توربین‌های گازی صادق نیست. در این توربین‌ها با افزایش سرعت توربین، فشار و دبی هوای ورودی توربین افزایش می یابد. این امر مستلزم افزایش انرژی سیال ورودی می باشد. 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

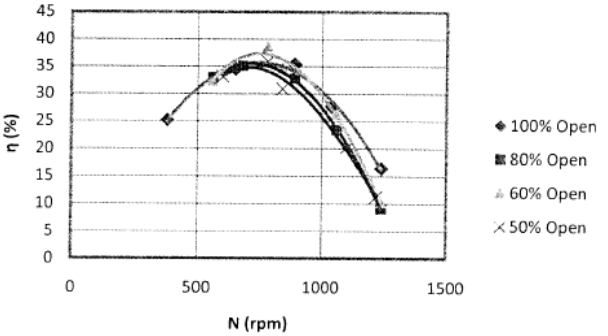
میزان افزایش توان تولیدی توربین بر اثر کاهش سرعت محور پدیده قابل ملاحظه‌ای است که بیشتر در زمینه مطالعات مکانیکی سیستم به آن پرداخته شده است که از آن جمله می‌توان به [2] اشاره نمود. نسبت $\frac{\Delta P}{\Delta f}$ در مطالعات توربین ها با ضریب D نشان داده می‌شود و به آن ضریب دمپینگ توربین اطلاق می‌گردد. 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 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) فشارهوای 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 براثر تغییر سرعت محور در هد آب ثابت

با اینحال علی‌رغم اینکه منحنی شکل‌های ۲ و ۳ و۴ تأثیرپذیری راندمان توربوبین- ژنراتورها رانسبت به تغییر سرعت چرخش بخوبی

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

نشان می دهند، تاکنون در مطالعات سیستم‌های قدرت به این مسئله توجه کافی نشده است. طبیعتاً این اثر در مدل‌سازی‌ها لحاظ گردیده است و یا اثر آن بطور توأم در ضریب D، که تغییرات بار در اثر فرکانس را نشان می‌دهد، لحاظ شده است. این در حالی است که عدم در نظر گرفتن این اثرات در مدل‌سازی و یا لحاظ نمودن اثر آن در ضریب D، می‌تواند سبب مشاهده تناقضاتی در رابطه با عملکرد توربین-ژنراتورها گردد که اساساً با مدلسازی‌های معمول قابل توجیه نمی‌باشد. به عبارت دیگر، عدم توجه به این ویژگی ممکن است منجر به برخی نتیجه گیری‌های ناصحیح در محاسبات گردد.

۵- مدل پیشنهادی

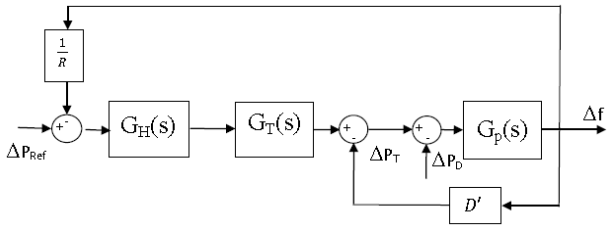
در این مقاله، با توجه به نتایج بدست آمده در بخش ۴ مدل مرسوم توسعه داده شده و مدلسازی توربین ژنراتور بصورت دقیق‌تری اصلاح گردیده است. همچنانکه مشاهده می‌شود، با توجه به مفهوم ضریب دمپینگ توربین، رابطه تغییرات توان تولیدی توربین نسبت به سرعت محور، (به شرط ثابت بودن سیستم ورودی توربین) یک منحنی است. این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

$$D' = \frac{\partial P_T}{\partial f} \qquad (۹)$$

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

$$\Delta P_T = G_T\left[G_H\left(\Delta P_{ref} - \frac{1}{R}\Delta f\right)\right] - D'\Delta f \qquad (۱۰)$$

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



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

مدل پیشنهادی فوق با صرف نظرکردن از دینامیک تغییرات توان تولیدی توربین براثر تغییر سرعت محور پیشنهاد داده شده است. با این حال، می‌توان برای مطالعات دقیق‌تر 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 اولبرای $F_D(s)$ استفاده نمود. این مدل در هیچیک از مدل‌های ارائه شده برای توربین مورد توجه قرار نگرفته است. در مطالعات مربوط به دینامیک سیستم، ممکن است این مدل مناسب‌تر باشد. در اینجا، فقط به این نکته اشاره می‌شود که در صورت استفاده از مدل مرتبه اول برای رفتار توربین، ثابت زمانی‌های آن از ثابت زمانی‌های مربوط به سیستم مکانیکی کوچکتر است. این مسئله می‌تواند در رفتار دینامیکی توربین- ژنراتور تأثیر قابل ملاحظه‌ای بگذارد. اگرچه در مطالعات مربوط به نوسانات فرکانس پایین،برای توربین مدل‌های بسیار دقیقی ارائه می‌شود[16]، با این حال، از این رفتار مهم و اساسی مربوط به توربین‌ها در مدل‌های مورد استفاده چشم پوشی شده است.

۶- ملاحظات مدل ارائه شده

از آنجایی که این مدل تاکنون بطور کامل در سیستم‌های 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 می‌شود که ضریب D و ضریب D' با یکدیگر جمع می‌گردند. به عبارت دیگر نقشی که این ضریب در رفتار توربین–ژنراتور ایفا می‌کند 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 می‌گردد. با این‌حال،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 ومجزا 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 می‌شود. این در حالی است که، ضریب D' از ویژگی‌های یک توربین بوده و برای هر توربین بطور مستقل تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر از آنجایی که در حلقه کنترل بار-فرکانس توربین–ژنراتور هر دو فیزیک توصیف شده (تغییرات توان شبکه 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 تحلیل‌ها جلوگیری شود.

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

است که، ضریب D' در توربین های مختلف متفاوت مـی‌باشـد و تـوان تولید شده هر توربین با تغییر فرکانس شـبکه بـه مقـدار خـاص خـود تغییر می‌کند. بنابراین، این تفاوت می‌تواند آثار گوناگونی بر روی انـواع مختلف ژنراتورها داشته باشد. علاوه بر آن، اندازه این پارامتر در حلقـه کنترل بار-فرکانس برخی از ژنراتورهـا نیـز بـه انـدازه‌ای اسـت کـه در بسیاری از مطالعات نمی‌توان از آن صـرفنظر کـرد. اگـر مقـدار D' بـر حسب پریونیت و بر مبنای مقادیر نامی ژنراتور محاسبه شـود، معمـولاً مقدار آن در توربین‌های مختلفو متناسب با تعداد قطب‌های ژنراتور در محدوده $0.2\ \text{P. U. (watt)}/Hz - 0.05$ قرار دارد. مشاهده می‌شـود که مقدار این ضریب به اندازه کافی بزرگ است. لذا، حذف این پـارامتر ممکن است خطای قابل ملاحظه در نتایج محاسبات بوجود آورد.

این نکته نیز قابل ذکر است که با وجود این کـه کـاهش سـرعت توربین باعث افزایش راندمان آن و بدنبال آن افزایش توان تولیـدی آن می‌گردد، ولی طراحان توربین، آن را بگونه ای طراحی نمی‌کنند که در راندمان ماکزیمم کار کند زیرا، در طراحی سیستم‌ها، معمـولاً سیسـتم در نقطه بهترین عملکرد طراحی می‌شود و این لزوماً به معنی طراحـی در نقطه ماکزیمم راندمان نیست. بعنوان مثـال، در تـوربین‌هـای بخـار می‌توان با کاهش سرعت محور توان خروجی توربین را افزایش داد. این در حالی‌است که، این شرایط می‌توانـد سـبب ایجـاد ذرات ریـز آب در توربین وخوردگی پره‌های توربین گردد.

۷- تأثیر مدل پیشنهادی در تحلیل مسائل سیستم‌های قدرت

همچنانکه مشاهده شد، جهت امکـان تحلیـل دقیـق‌تـر سیسـتم‌هـای قدرت، لازم است به حلقه کنترل اتوماتیـک بـار-فرکـانس یـک شـاخه اضافه گردد. مطابق طرح پیشنهادی این شـاخه مـوازی حلقـه گـاورنر توربین می باشد. بطورکلی تأثیر حلقه گاورنر در انـدازه تـوان خروجـی بزرگ است و لذا شاخه پیشنهادی موازی در صـورتی‌کـه زمـان کـافی برای اعمال اثر گاورنر وجود داشته باشد، تأثیر زیادی نخواهـد داشـت. بنابراین، حذف این شاخه با خطای قابل ملاحظه همراه نخواهد بود. بـا این حال، در زمان‌های کوتاه و قبل از بـروز رفتـار گـاورنر، ایـن شـاخه نقش قابل ملاحظه‌ای در رفتار توربین و ژنراتور خواهد داشت. می توان رفتار شبکه را در برخی از موارد از جمله در صورت افزایش یـا کـاهش 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 تحلیـل گردد.

یکی از مسائل مهم در مطالعات سیستم‌های قدرت، که استفاده از مدل ارائه شده می تواند در نتایج آن تأثیر داشته باشد، مسئله نوسانات فرکانس پایین است. این پدیده که می‌تواند اثرات نامطلوبی بر سیستم-های قدرت داشـته باشـد، امـروزه مـورد توجـه محققـین قـرار دارد و مطالعات متنوعی در مورد آن انجام می‌شود. در مطالعات مرسوم در این زمینه اساساً گشتاور محور ثابت فرض می شود. در برخـی از مطالعـات نیز سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور نیز مدلسازی می‌شود. اما به علـت بزرگ بودن ثابت زمانی سیستم مکانیکی تأثیر آن قابل اغمـاض اسـت. به همـین دلیـل، اسـتفاده از پایدارسـازهای مکـانیکی در میـرا کـردن نوسانات مکانیکی بوجود آمده بی‌تأثیر یا کم‌تأثیر اسـت. ایـن در حـالی است که بر اساس مدل توسعه یافته و بررسی آن می‌توان نتیجه گرفت که با در نظرگرفتن اثر ضریب دمپینـگ تـوربین، فـرض ثابـت مانـدن گشتاور محور فرض صحیحی نیسـت و عمـلاً بـا تغییـر سـرعت محـور ژنراتور، توان مکانیکی آن تغییر می‌کند. بـرای نشـان دادن ایـن تـأثیر کافی است با شبیه‌سازی مناسب اثـر ایـن پـارامتر را در رفتـار ژنراتـور بررسی کرد.

به منظور ارزیابی تأثیر ضریب دمپینگ توربین، از شبیه‌سازی یک سیستم چند ماشینه که در آن از مدل معرفی شـده در [17] اسـتفاده شده است، بهره گرفته می‌شود. این مدل شامل چهار ماشین سـنکرون مشابه است که بصورت متقارن نسبت به یکدیگر قرارگرفته‌اند و دو بـار بزرگ را تغذیه می‌کنند. مشخصات و پارامترهای مربوط به سیسـتم در ضمیمه این مقاله مشاهده می شود. نقطه کار سیستم بصـورتی تعیـین گردیـده اسـت کـه دو قطـب $0.12 \pm j3.47$ در سـمت راسـت محـور موهـومی دارد و سیسـتم ناپایـدار اسـت. بـا بررسـی ضـریب تـأثیر ژنراتورها، مشاهده می‌شود که ژنراتور واحـد ۳ دارای ضـریب تـأثیر بزرگتری است و بنابراین، با طراحی یک PSS برای این واحد می‌توان شبکه را پایدار نمود. در صورت استفاده از این PSS، مشاهده می‌شـود کـه قطـب‌هـای ناپایـدار سیسـتم جابجـا شـده و مقـدار آنهـا بـه مقادیر $-0.35 \pm j3.59$ تغییر خواهند یافت.

حال اگر فقط ضریب دمپینگ توربین واحد ۳ در محاسبات اعمال گـردد (بعنـوان مثـال یـک تـوربین بـا ضـریب دمپینـگ $0.2\ \text{P.U.(MW)}/H_z$)، مشاهده می‌شود که قطب‌های ناپایدار سیسـتم تغییر کرده و مقادیر آنها به مقادیر $-0.13 \pm j3.41$ تغییر خواهند یافت. چنانچه در این حالت PSS طراحی شده قبلی اعمـال گـردد، مشـاهده می‌شود که قطب‌ها به مقدار زیادی به سمت چپ جابجا شده و مقادیر آنها برابر $-0.70 \pm j3.41$ خواهندشد.

از آنجایی که ضریب دمپینگ توربین‌ها ممکن است منفـی گـردد (بصورت پایدار یـا کوتـاه مـدت)، اگـر تـوربین واحـد ۳ دارای ضـریب دمپینگ منفی باشد (بعنوان مثـال یـک تـوربین بـا ضـریب دمپینـگ $-0.2\ \text{P.U.(MW)}/H_z$)، مشاهده می شود که باوجود استفاده از PSS، قطب‌های سیستم برابر با $-0.01 \pm j3.74$ خواهند شد که نشان می‌دهد که دمپینگ سیستم از بین رفته است و سیستم رفتار ناپایـدار از خـود نشان خواهد داد.

۸- نتیجه‌گیری

در مدل مرسوم حلقه کنترل فرکانس در مطالعات مربـوط بـه سیسـتم توربین ژنراتور، برخی از رفتارهای سیستم به صورت کامل مدل نمـی-گردد. لذا، در مواردی ممکن است شـاهد تنـاقض در نتـایج باشـیم. در

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

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 حالی‌است که، با توجه به تغییر توان توربین ناشی از تغییر سرعت آن، لازم است این رفتارها دربلوک 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 مدل های مرسوم را برطرف نماید. علاوه بر آن، مدل ارائه شده یک ویژگی اساسی سیستم مکانیکی توربین زنراتور را که می‌تواند در پیدایش نوسانات فرکانس کم ژنراتور تأثیر بسزایی داشته باشد،در نظر می‌گیرد. در اینمدل،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=.0025 X_d=1.8 X_q=1.7 X'_d=0.3 X'_q=0.55
T'_{d0}=8 T'_{q0}=0.4 K_A=200 T_A=0.01
H_g=6.5 X_T=0.15 p.u
P_{g1}= P_{g2}= P_{g4}=700 MW P_{g3}=719 MW
V_{g1}= V_{g3}= 1.01 p.u V_{g2}= V_{g4}= 1.03 p.u

ب) مشخصات بارها

P_{L1}= 967 MW Q_{L1}=100 MVAR
P_{L2}= 1767 MW Q_{L2}=100 MVAR

L_1 به شین ۳ و L_2 به شین ۵ متصل است.

ج) مشخصات خطهای انتقال

جدول (۱): مشخصات خطوط انتقال

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

امپدانس و ادمیتانس واحد طول هر خط انتقال:

R_L=0.0001 p.u/km
X_L=0. 001 p.u/km
B_L=0.00175 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. andLaskowski,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", IEEETrans. 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

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.

زیرنویس‌ها

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

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]