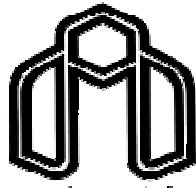


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

کنترل سطح آب در مولد بخار یک نیروگاه هسته‌ای با روش فازی

احمد حسینی

استاد راهنما

دکتر محمد حدادظریف

استاد مشاور

دکتر محمد مهدی فاتح

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم

به پدرم و مادرم،

آنها که در دشوارترین لحظات زندگی یاورم بودند.

تشکر و قدردانی

با سپاس از عنایات خداوند که بار دیگر به لطف بی‌کرانش توانستم گامی هر چند کوچک در ادامه راه زندگی‌ام بردارم که بی‌تردید اگر لطفش نبود، سختی‌های راه ادامه آن را بس دشوار می‌نمود. با سپاس از اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر محمد حدادظریف و جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح که با راهنمایی‌های ارزشمند خود نقش بسزایی در به ثمر رسیدن این پروژه داشته‌اند. با سپاس از اساتید بزرگواری که در طول دوران تحصیل افتخار حضور در کلاس‌های درس ایشان را داشته‌ام. همچنین از آقای دکتر علی اکبرزاده و آقای دکتر حسین قلی‌زاده به دلیل تقبل استاد ممتحنی این پایان‌نامه نهایت تشکر و تقدیر را می‌کنم.

از پدر و مادر عزیزم و خواهر و برادرانم که شرایط ادامه تحصیل مرا فراهم نموده و همواره مشوقم بودند، بی‌نهایت سپاس‌گذارم.

چکیده

یکی از اجزاء کلیدی نیروگاه‌های هسته‌ای مولد بخار است که نقش رابط بین خنک‌کننده مدار اولیه راکتور هسته‌ای و سیال کاری را ایفا می‌کند. عملکرد این جزء از نیروگاه به صورت مستقیم بر راکتور هسته‌ای و توربین تأثیرگذار است. به طوریکه اگر مولد بخار نتواند بخار کاملاً خشکی را تولید نماید، ذرات آب موجود در بخار باعث ضربه زدن به پره‌های توربین شده و بعد از مدتی باعث خرابی توربین می‌شود. همچنین اگر مولد بخار نتواند به خوبی حرارت تولید شده توسط راکتور هسته‌ای را برداشت نماید، خاموش‌سازی راکتور را به دنبال خواهد داشت. با توجه به این موضوع، بسیار مهم است که بتوانیم سطح آب مولد بخار را در یک محدوده معین نگه داریم زیرا افزایش بیش از حد سطح آب در مولد بخار باعث وارد شدن بخار مرطوب به توربین می‌شود. و ذرات آب موجب از بین بردن پره‌های توربین می‌شوند. کاهش سطح آب باعث کاهش میزان حرارت برداشت شده از راکتور و خاموش شدن آن می‌شود. کنترل سطح آب، مولدهای بخار با توجه به ویژگی‌های، غیرخطی، نامینیمم فاز، پیچیده و متغیر با زمان بودن آنها، به خصوص در توان‌های پایین باعث مشکل شدن آن گردیده است. هدف اصلی در این پروژه، دستیابی به پاسخ گذرای بهتر مولد بخار و کاهش میزان فراجهدش و فروجهش آن، در حضور اغتشاش فلو بخار خروجی، خصوصاً در قدرت‌های پایین می‌باشد. برای دستیابی به این هدف به طراحی کنترل‌کننده‌های کلاسیک و فازی پرداخته و عملکرد آنها مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: نیروگاه هسته‌ای، مولد بخار، کنترل سطح آب، کنترل‌کننده‌های کلاسیک و فازی

فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ تاریخچه کارهای پیشین.....	۳
۳-۱ ساختار پایان نامه.....	۵
فصل دوم: آشنایی با نیروگاه‌های هسته‌ای ، مولدهای بخار.....	۶
۱-۲ مقدمه.....	۷
۲-۲ عناصر طبیعی	۷
۳-۲ غنی‌سازی اورانیم	۸
۴-۲ شکاف هسته‌ای.....	۹
۵-۲ بررسی نیروگاه‌های هسته‌ای.....	۱۰
۱-۵-۲ اجزاء نیروگاه.....	۱۲
۶-۲ مولد بخار.....	۱۳
۱-۶-۲ طبقه بندی انواع مولدهای بخار.....	۱۴
۲-۶-۲ مولدهای بخار افقی.....	۱۵
۳-۶-۲ طرز کار مولدهای بخار.....	۱۶
۱-۳-۶-۲ بررسی الگوی جریان در مولدهای بخار WWER- 440.....	۱۶
۲-۳-۶-۲ بررسی الگوی جریان در مولدهای بخار عمودی.....	۱۶

۷-۲	بررسی نقش مولدهای بخار در گزیره‌های عملیاتی.....	۱۹
۸-۲	نتیجه‌گیری.....	۲۳
فصل سوم: طراحی کنترل‌کننده کلاسیک برای مولدهای بخار.....		
۱-۳	مقدمه.....	۲۴
۲-۳	مدل ریاضی مولدهای بخار.....	۲۵
۱-۲-۳	بررسی مدل مولد بخار.....	۲۹
۱-۱-۲-۳	مدل سازی زیرسیستم اول.....	۳۰
۲-۱-۲-۳	موازنه جرم و انرژی کلی برای زیرسیستم اول.....	۳۰
۳-۱-۲-۳	موازنه جرم و انرژی در لوله‌های بالابرنده.....	۳۲
۴-۱-۲-۳	جریان جرم در گردش طبیعی.....	۳۴
۵-۱-۲-۳	توزیع بخار در استوانه.....	۳۴
۶-۱-۲-۳	شرایط اولیه برای زیرسیستم اول.....	۳۷
۷-۱-۲-۳	مدل سازی زیرسیستم دوم.....	۳۷
۸-۱-۲-۳	زیرسیستم دوم در حالت تعادل.....	۳۹
۹-۱-۲-۳	مدل سازی زیر سیستم سوم و چهارم و پنجم	۳۹
۳-۳	مشکلات کنترل مولد بخار.....	۳۹
۱-۳-۳	ناپایدار بودن سیستم حلقه باز.....	۴۰
۲-۳-۳	بررسی پدیده‌های ترموهیدرولیکی انبساط و انقباض در مولدهای بخار	۴۲
۴-۳	کنترل‌کننده‌های کلاسیک PID.....	۴۳

۴۵.....	۱-۴-۳ طراحی کنترل کننده کلاسیک PI برای مولد بخار
۴۶.....	۲-۴-۳ طراحی کنترل کننده برای قدرت های بالاتر
۵۱.....	۵-۳ ارتباط سیستم کنترل سطح آب در مولدهای بخار و تنظیم قدرت در نیروگاه
۵۲.....	۶-۳ نتیجه گیری

فصل چهارم: طراحی کنترل کننده فازی مولد بخار..... ۵۳

۵۴.....	۱-۴ مقدمه
۵۵.....	۲-۴ نگاهی به سیستم های فازی
۵۶.....	۳-۴ ساختار سیستم های فازی
۵۸.....	۱-۳-۴ سیستم های فازی تاکاگی سوگنو و کانگ (TSK)
۵۸.....	۲-۳-۴ سیستم های فازی با فازی ساز و غیرفازی ساز
۵۸.....	۱-۲-۳-۴ پایگاه قواعد فازی
۵۹.....	۲-۲-۳-۴ موتور استنتاج فازی
۶۱.....	۳-۲-۳-۴ فازی سازها
۶۲.....	۴-۲-۳-۴ غیرفازی سازها
۶۴.....	۴-۴ طراحی کنترل کننده فازی برای مولد بخار
۶۷.....	۵-۴ شبیه سازی کنترل کننده فازی مولد بخار در محیط سیمولینک
۶۸.....	۶-۴ مقایسه عملکرد کنترل کننده های کلاسیک و فازی
۶۹.....	۱-۶-۴ عملکرد کنترل کننده فازی در سطح قدرت ۵ درصد
۷۰.....	۲-۶-۴ عملکرد کنترل کننده فازی در سطح قدرت ۱۵ درصد

۳-۶-۴ عملکرد کنترل کننده فازی در سطوح قدرت بالاتر ۷۱

۴-۶-۴ اعمال اغتشاش به مولد بخار به صورت تناوبی ۷۳

۷-۴ بررسی پایدار بودن کنترل کننده در برابر تغییر در پارامترهای مدل ۷۴

۸-۴ نتیجه گیری ۷۶

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۷

۱-۵ نتیجه گیری ۷۸

۲-۵ پیشنهادها ۷۸

ضمیمه

ضمیمه الف- بخشی از بلوک های طراحی شده در simulink ۸۰

مراجع ۸۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ مشخصات اصلی مولد بخار افقی نیروگاه WWER-1000..... ۲۰
- جدول ۱-۳ مقادیر پارامترهای مولد بخار در قدرت‌های مختلف..... ۲۷
- جدول ۲-۳ مقدار ضرایب جملات تناسبی انتگرالی کنترل‌کننده PI، در سطوح قدرت مختلف..... ۴۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ شمای کلی یک نیروگاه هسته‌ای..... ۱۱
- شکل ۲-۲ نمای برش یافته یک مولد بخار افقی..... ۱۵
- شکل ۳-۲ الگوی جریان در یک مولد بخار WWER- 440..... ۱۶
- شکل ۴-۲ شمای یک مولد بخار عمودی..... ۱۷
- شکل ۵-۲ شمای کلی یک مولد بخار..... ۲۱
- شکل ۱-۳ اجزاء موثر بر دینامیک مولد بخار..... ۳۰
- شکل ۲-۳ تبخیر آب درلوله بالابرنده..... ۳۲
- شکل ۳-۳ مخلوط دو فازی و جدایش مایع و بخار در استوانه..... ۳۵
- شکل ۴-۳ مافوق گرم‌کن‌ها و شیر کنترل بخار خروجی..... ۳۸
- شکل ۵-۳ مکان هندسی ریشه‌ها برای تابع تبدیل سطح آب نسبت به دبی آب تغذیه ورودی..... ۴۱
- شکل ۶-۳ دیاگرام بودی تابع تبدیل سطح آب نسبت به دبی آب تغذیه ورودی..... ۴۱
- شکل ۷-۳ پاسخ مولد بخار به دبی آب تغذیه ورودی (چپ) و دبی بخار خروجی (راست)..... ۴۳
- شکل ۸-۳ ساختار یک سیستم حلقه بسته..... ۴۴
- شکل ۹-۳ بلوک دیاگرام مولد بخار..... ۴۵

- شکل ۳-۱۰ ساختار حلقه کنترلی برای مولد بخار..... ۴۵
- شکل ۳-۱۱ پاسخ پله کنترل کننده PI طراحی شده در قدرت های ۵ و ۱۵ درصد..... ۴۷
- شکل ۳-۱۲ آب تغذیه اعمالی به مولد بخار در سطح قدرت ۵ و ۱۵ درصد..... ۴۷
- شکل ۳-۱۳ پاسخ پله کنترل کننده PI طراحی شده در قدرت های ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد..... ۴۸
- شکل ۳-۱۴ سیگنال کنترلی کنترل کننده کلاسیک PI در قدرت های ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد..... ۴۹
- شکل ۳-۱۵ آب تغذیه اعمالی به مولد بخار در سطح قدرت ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد..... ۴۹
- شکل ۳-۱۶ سیگنال خطا..... ۵۰
- شکل ۴-۱ بدنه اصلی مدل شبیه سازی شده مولد بخار در Simulink..... ۶۷
- شکل ۴-۲ پاسخ پله کنترل کننده فازی و PI در سطح قدرت ۵ درصد..... ۶۹
- شکل ۴-۳ آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطح قدرت ۵ درصد..... ۷۰
- شکل ۴-۴ پاسخ پله کنترل کننده فازی و PI در سطح قدرت ۱۵ درصد..... ۷۰
- شکل ۴-۵ آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطح قدرت ۱۵ درصد..... ۷۱
- شکل ۴-۶ پاسخ پله کنترل کننده فازی در سطوح قدرت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد..... ۷۱
- شکل ۴-۷ آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطوح قدرت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد..... ۷۲
- شکل ۴-۸ سیگنال خطا..... ۷۳
- شکل ۴-۹ پاسخ پله کنترل کننده فازی در برابر اغتشاش تناوبی..... ۷۴
- شکل ۴-۱۰ سیگنال کنترلی اعمال شده به مولد بخار..... ۷۴
- شکل ۴-۱۱ پاسخ پله کنترل کننده فازی در برابر تغییر پارامتر..... ۷۵
- شکل ۴-۱۲ آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطح قدرت ۵ درصد..... ۷۵
- شکل ۴-۱۳ خطا خروجی در سطح قدرت ۵ درصد..... ۷۶

شکل‌های پیوست

شکل الف- ۱- بدنه اصلی مدل شبیه سازی شده مولد بخار در سیمولینک ۸۰

شکل الف- ۲- طراحی کنترل کننده فازی مولد بخار..... ۸۰

شکل الف- ۳- طراحی کنترل کننده PI مولد بخار..... ۸۱

فصل اول

مقدمه

انرژی الکتریکی از روش‌های مختلفی از قبیل پیل‌های الکتریکی، نیروگاه‌ها^۱ قابل حصول است. نیروگاه‌ها نقش بسیار زیادی در تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز برای انسان داشته و حجم وسیعی از انرژی الکتریکی را تولید می‌کنند. انواع نیروگاه‌هایی که در سطح جهان به امر تولید برق اشتغال دارند عبارتند از: نیروگاه‌های بخار، آبی، گازی، سیکل ترکیبی، اتمی، خورشیدی، بادی، جذر و مدی دریا، دیزلی و... به طوریکه از نام این نیروگاه‌ها برمی‌آید هر یک از آنها برای تولید برق، فن‌آوری ویژه‌ای دارند. هرکدام از این نیروگاه‌ها از سوخت‌های مختلفی برای تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند.

به عنوان مثال در نیروگاه‌های فسیلی از سوخت فسیلی^۲ برای تولید انرژی اولیه مورد نیاز برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود و یا در نیروگاه‌های هسته‌ای^۳ از انرژی حاصل از شکافت هسته برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. سوخت فسیلی یکی از مهمترین سوخت‌های موجود در جهان بوده که دارای منابع محدود است. کشورهایی که این نوع سوخت را نداشته و دستیابی به آن برای آنها دارای هزینه بالایی است، از انرژی‌هایی از قبیل انرژی آب، باد، هسته‌ای و ... برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند. از جمله این کشورها می‌توان به ژاپن، فرانسه و کانادا اشاره کرد. این کشورها قسمت اعظمی از انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از طریق نیروگاه‌های هسته‌ای تأمین می‌کنند، در کشور فرانسه حدود ۸۰ درصد انرژی الکتریکی از انرژی هسته‌ای تأمین می‌گردد[۱]. بنابراین نیروگاه‌های هسته‌ای نیز در نوع خود از اهمیت خاصی برخوردار هستند. در این نوع نیروگاه‌ها انرژی اولیه لازم بوسیله یک راکتور هسته‌ای تأمین می‌گردد. خاموش و روشن کردن مجدد نیروگاه‌های هسته‌ای هزینه زیادی در بردارد. به همین خاطر هر چه تعداد خاموش کردن این

^۱ - power plants

^۲ - Fossil Fuel

^۳ - Nuclear power plant

نیروگاه‌ها کمتر باشد از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر خواهد بود. از دید کنترلی وجود برخی پیچیدگی -

ها در مولد بخار^۱، کنترل سطح آب را دشوار می‌سازد. این پیچیدگی‌ها عبارتند از:

- غیر مینیمم فاز^۲ بودن مولد بخار، ناشی از پدیده انبساط و انقباض.
- بروز دینامیک‌های مختلف با توجه به تغییرات سطح توان کاری مولد بخار.
- غیرخطی و پیچیده بودن مدل مولد بخار و برخی از اجزای آن مانند شیرهای اصلی و کنارگذر آب تغذیه [۲].

اولین مسأله‌ای که در کنترل یک سیستم مطرح می‌شود داشتن مدل دقیقی از سیستم تحت کنترل است. از آنجا که انتظار داریم کنترل‌کننده پیشنهاد شده برای یک سیستم، روی سیستم واقعی بطور مطلوبی عمل کند باید مدلی که در شبیه‌سازی‌ها برای مولد بخار در نظر می‌گیریم تا حد ممکن به سیستم واقعی نزدیک باشد. برای اینکه بتوانیم مدل واقعی‌تری از یک مولد بخار داشته باشیم، باید پارامترهای مدل در نظر گرفته شده در هر لحظه تعیین گردند. در مقالات مختلف مدل‌های متفاوتی برای مولد بخار ارائه شده است. ولی اکثر این مدل‌ها برای مولد بخار، در توان‌های خاصی بدست آمده است و تمام نقاط کاری آنها را پوشش نمی‌دهد. در این پژوهش رفتار دینامیکی مولد بخار افقی، که یک سیستم دینامیکی پیچیده غیرخطی بوده و ضرایب معادلات دینامیکی آن تابع نقطه کار هستند، در دامنه گسترده‌ای از قدرت کنترل می‌شود.

۲-۱ تاریخچه کارهای انجام شده

روش‌های بسیاری برای کنترل سطح آب در مولد های بخار پیشنهاد شده است [۳]. در سال ۱۹۸۰ اروپینگ یک مدل خطی با پارامترهای متغیر، برای توصیف دینامیک‌های مولد بخار در همه سطوح قدرت، پیشنهاد داده است. سپس او یک مدل PID تطبیقی پیشنهاد داد. فلاچی، در سال ۱۹۸۸ یک

¹ - Steam generator

² - Nonminimum Phase

کنترل کننده فیدبک خروجی گزارش داد. چو در سال ۱۹۸۹، یک کنترل کننده نوع PI، همراه یک رویت گر جهت تخمین مقدار سطح آب بکار برده است. نا در سال ۱۹۹۵ یک کنترل کننده سطح آب وابسته به تخمین خطاهای فلو بخار و آب تغذیه پیشنهاد داده است. چو و نو [۴]، در سال ۱۹۹۷ یک تنظیم کننده بهره فازی مقاوم^۱ را برای کنترل سطح آب مولد های بخار بکار برده اند. بهره های H_{∞} ، در آن طوری طراحی شده اند که به ازای آنها، اثرات ناشی از اغتشاشات دبی بخار خروجی بر سطح آب مولد بخار به کمترین مقدار خود برسد. کوتاره [۵]، در سال ۲۰۰۰، کنترل کننده مبتنی بر پیشگویی مدل^۲ را برای کنترل سطح آب مولد بخار هسته ای بکار می برد. این نوع کنترل کننده که در کنترل پروسه های صنعتی بکار می رود، وجود محدودیت ها در سیگنال کنترلی اعمالی و سیگنال خروجی را مورد توجه قرار داده و سعی می کند با در نظر گرفتن عملکرد سیستم کنترلی در آینده، سیگنال های فعلی را برای رسیدن به یک هدف کنترلی مطلوب و بهینه^۳ محاسبه و اعمال کند. نا در سال ۲۰۰۳ یک کنترل کننده تطبیقی پیشگوی^۴، برای کنترل سطح آب در مولد بخار ارائه داده است روش کنترل پیشگوی، سعی در حل یک مسأله بهینه سازی در زمان فعلی بر حسب پله های زمانی آتی دارد. همچنین از یک الگوریتم تخمین تکراری پارامتر^۵، برای تخمین مدل مولد بخار در هر لحظه استفاده می کند [۶]، منهاج و الیاسی در سال ۲۰۰۷ یک مدل فازی - تطبیقی^۶ بکار برده اند [۷]، در این روش از کنترل پیشگوی در کنار تئوری فازی برای طراحی یک کنترل کننده مناسب استفاده شده است. کنترل کننده دارای سه قسمت است. (۱) یک مدل فازی TSK برای تخمین رفتار^۷ آینده مولد بخار، (۲) از یک الگوریتم بازگشتی^۸ برای تخمین پارامترهای مدل، (۳) یک کنترل کننده پیشگوی مدل برای بدست آوردن ورودی های بهینه استفاده شده است. در آخرین روش ارائه

^۱ - Robust fuzzy logic gain scheduler

^۲ - Model predictive controller

^۳ - Optimal

^۴ - Adaptive predictive controller

^۵ - Recursive parameter estimation algorithm

^۶ - Adaptive fuzzy model

^۷ - Estimation behavior

^۸ - Recursive algorithm

شده توسط زانگ فنگ در سال ۲۰۱۰ یک کنترل کننده فازی لغزشی^۱ بکار برده است [۸]، در این روش از خصوصیت مقاوم بودن ترکیب کنترل کننده ساختار متغیر با منطق فازی استفاده شده است، سیستم کنترلی بعلت مقاوم بودن خاصیت ساختار و کنترل فازی میزان نوسان ساختار متغیر را کاهش داده است و در برابر تغییرات بارگذاری و اغتشاش خارجی مقاوم است. علارغم وجود بسیاری از کنترل کننده های پیشرفته برای مولد بخار، اپراتورها هنوز دارای مشکلاتی ویژه در سطوح پایین قدرت هستند. بنابراین وجود یک کنترل خوب با یک کارکرد بالا، به جای کنترل کننده های دستی نیاز است [۹].

۳-۱ ساختار پایان نامه

پایان نامه مشمل بر پنج فصل است. در فصل اول مقدمه ای درباره موضوع تحقیق، و تاریخچه ای از کارهای انجام شده بررسی شده است. در فصل دوم نگاهی درباره نیروگاه های هسته ای و چگونگی شکافت هسته^۲ و کارهایی که در این زمینه انجام شده است، خواهیم داشت، در فصل سوم، پس از معرفی مشکلات کنترلی مولدهای بخار و توضیح آنها، با مدلی از مولد بخار که برای طراحی کنترل کننده، بکار می رود، آشنا می شویم، همچنین به طراحی کنترل کننده های کلاسیک برای مولد بخار پرداخته می شود. در فصل چهارم به معرفی کنترل کننده های فازی پرداخته، ساختار کنترل کننده بسیار ساده بوده و کمترین قانون در قسمت قواعد فازی آن بکار رفته است و از آنها برای کنترل مولد بخار استفاده شده است. و عملکرد این کنترل کننده را در برابر کنترل کننده کلاسیک PI بررسی خواهیم کرد. در ادامه در فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات بیان شده است.

¹ - Sliding fuzzy controller

² - Nuclear fission

فصل دوم

آشنایی با نیروگاه‌های هسته‌ای و مولدهای بخار

امروزه یکی از مهم‌ترین شکل‌های انرژی که در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، انرژی برق است. در حال حاضر انواع نیروگاه‌هایی که در کشور ایران در دست بهره‌برداری قرار دارند. عبارتند از: نیروگاه-های آبی، گازی، دیزلی، بادی، خورشیدی، سیکل ترکیبی و... نوع اتمی آن نیز با همت و تلاش متخصصان کشورمان شروع به کار کرده است. استفاده از انرژیهای خدادادی موجود در طبیعت، همیشه مورد نظر بوده است. مطالعات گوناگونی برای تغییر شکل انرژی، به طوری که به کارگیری آن ساده باشد، صورت گرفته است. حاصل این کوشش، انرژی الکتریکی است که از تبدیل سایر انرژی‌ها به دست می‌آید.

۲-۲ عناصر طبیعی

برحسب نظریه اتمی عنصر عبارت است از یک جسم خالص ساده که با روش‌های شیمیایی نمی‌توان آن را تفکیک کرد. از ترکیب عناصر با یکدیگر اجسام مرکب^۱ به وجود می‌آیند. تعداد عناصر شناخته شده در طبیعت حدود ۹۲ عنصر است. هیدروژن اولین و ساده ترین عنصر و پس از آن هلیوم، کربن، ازت، اکسیژن و ... بالاخره آخرین عنصر طبیعی به شماره ۹۲، عنصر اورانیوم است. بشر توانسته است به طور مصنوعی و به کمک واکنش‌های هسته‌ای در راکتورهای اتمی^۲ و یا به کمک شتاب دهنده‌های قوی بیش از ۲۰ عنصر دیگر بسازد که تمام آن‌ها ناپایدارند و عمر کوتاه دارند و به سرعت با انتشار پرتوهایی تخریب می‌شوند. اتم‌های یک عنصر از اجتماع ذرات بنیادی به نام پرتون، نوترون و الکترون تشکیل یافته‌اند. اتم هیدروژن یک پرتون دارد و در خانه شماره یک جدول و اتم هلیوم در خانه شماره دو، اتم سدیم در خانه شماره یازده و... اتم اورانیوم در خانه شماره ۹۲ قرار دارد. یعنی دارای ۹۲ پرتون است.

^۱ - Coposite materials

^۲ - Atomic reactors

های دیگر قابل تبدیل است. ماده را می‌توان به انرژی تبدیل نمود [۱۰]. آلبرت انیشتن، فرمول ریاضی خاصی را برای شرح این نظریه ارائه نموده است، انرژی (E) برابر است با حاصلضرب جرم (m) در سرعت نور به توان دو

$$E = MC^2 \quad (۱-۲)$$

۲-۴ شکاف هسته‌ای^۱

هسته اتم می‌تواند شکافته شود، زمانیکه این مسئله رخ می‌دهد، مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود. این انرژی به دو صورت گرما و نور است. انیشتن معتقد بود که مقدار کوچکی از ماده حاوی مقدار زیادی انرژی است. زمانیکه این انرژی، آهسته از اتم خارج می‌شود، می‌توان آنرا مهار کرد و تولید برق نمود. اما زمانیکه انرژی موجود در هسته اتم بطور ناگهانی آزاد شود، انفجار عظیمی مانند بمب اتم رخ می‌دهد. سوخت یک نیروگاه هسته‌ای، اورانیوم است. اورانیوم عنصری است که در اکثر مناطق جهان از زیرزمین استخراج می‌شود. اورانیوم بعد از مرحله کانه‌آرایی بصورت قرصهای بسیار کوچکی در داخل میله‌های^۲ بلند قرار گرفته و داخل راکتور نیروگاه نصب می‌شوند. در داخل راکتور یک نیروگاه اتمی، اتمهای اورانیوم تحت یک واکنش زنجیره‌ای کنترل شده، شکافته می‌شوند. در یک واکنش زنجیره‌ای، ذرات حاصل از شکافت اتم به سایر اتمهای اورانیوم برخورد کرده و باعث شکافت آنها می‌گردند. هر یک از ذرات آزاد شده مجدداً باعث شکافت سایر اتمها در یک واکنش زنجیره‌ای می‌شود. در نیروگاه های هسته‌ای، معمولاً از یک سری میله‌های کنترل جهت تنظیم سرعت واکنش زنجیره‌ای عدم کنترل این واکنش‌ها می‌تواند منجر به تولید بمب اتم شود. واکنش‌های زنجیره‌ای همچنین باعث تولید یک سری مواد رادیواکتیو^۳ می‌شوند. این مواد در صورت رهایی می‌توانند به مردم آسیب برسانند. بنابراین آنها را به شکل جامد نگهداری می‌کنند. واکنش‌های زنجیره‌ای باعث تولید انرژی گرمایی می‌شوند. این

^۱ - Nuclear Cloven

^۲ - Rods

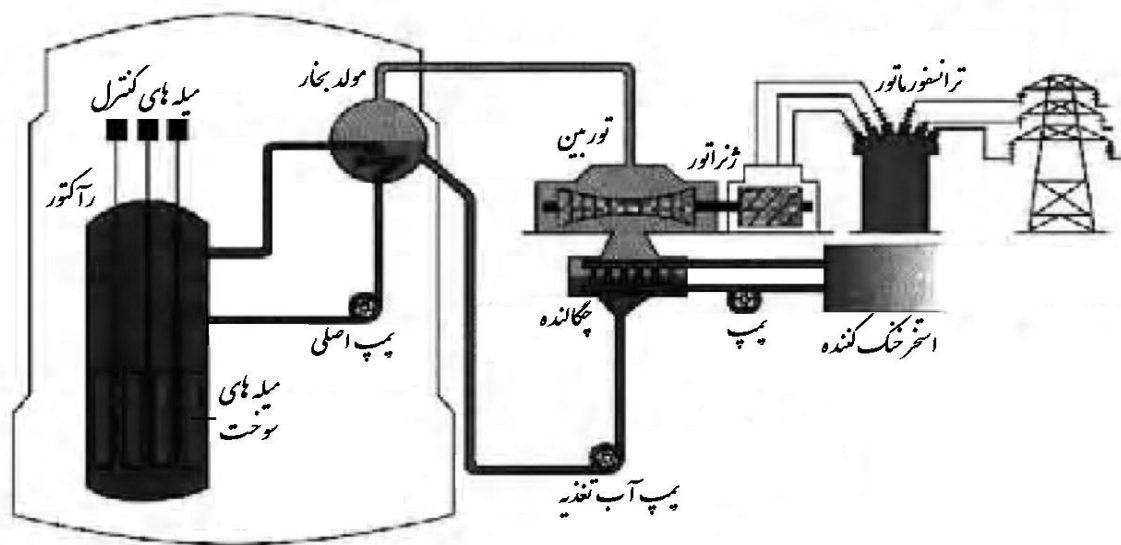
^۳ - Radioactive

انرژی گرمایی برای جوشاندن آب در قلب راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملاً در صنایع نظامی از این روش استفاده نمی‌شود و بمب‌های اتمی را از پلوتونیوم ۲۳۹ که سنتز و تخلیص شیمیایی آن بسیار ساده‌تر است تهیه می‌کنند. عنصر اخیر را در نیروگاه‌های بسیار قوی می‌سازند که تعداد نوترون‌های موجود در آنها از صدها هزار میلیارد نوترون در سانتیمتر مربع تجاوز می‌کند. عملاً کلیه بمب‌های اتمی از این عنصر درست می‌شوند. روش ساخت این عنصر در داخل نیروگاه‌های اتمی به صورت زیر است: ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۸ شکست‌پذیر نیستند ولی جاذب نوترون کم انرژی (نوترون حرارتی) هستند. تعدادی از نوترون‌های حاصل از شکست اورانیوم ۲۳۵ را جذب می‌کنند و تبدیل به اورانیوم ۲۳۹ می‌شوند. این ایزوتوپ از اورانیوم بسیار ناپایدار است و در کمتر از ده ساعت تمام اتم‌های به وجود آمده تخریب می‌شوند. در درون هسته پایدار اورانیوم ۲۳۹ یکی از نوترون‌ها خود به خود به پروتون و یک الکترون تبدیل می‌شود. بنابراین تعداد پروتون‌ها یکی اضافه شده و عنصر جدید را که ۹۳ پروتون دارد نپتونیم می‌نامند که این عنصر نیز ناپایدار است و یکی از نوترون‌های آن خود به خود به پروتون تبدیل می‌شود و در نتیجه به تعداد پروتون‌ها یکی اضافه شده و عنصر جدید که ۹۴ پروتون دارد را پلوتونیوم می‌نامند. این تجربه طی چندین روز انجام می‌گیرد. بنابراین، به جای سوزاندن سوخت، در نیروگاه‌های هسته‌ای، اتم‌ها از طریق واکنش زنجیره‌ای شکافته شده و انرژی گرمایی تولید می‌کنند [۱۰].

۲-۵ بررسی نیروگاه‌های هسته‌ای

از مزایای نیروگاه‌های هسته‌ای نسبت نوع فسیلی مقرون به صرفه‌تر بودن آنهاست [۴]. راکتور (۱۰۰۰- WWER)، یک راکتور هسته‌ای با آب تحت فشار^۱ بوده، عدد بعد از نوع راکتور معمولاً نشان دهنده قدرت اسمی واحد می‌باشد. بنابراین، (۱۰۰۰- WWER) مشخص کننده یک راکتور با توان ۱۰۰۰ مگاوات الکتریکی است. در شکل (۲-۱) شمای کلی یک نیروگاه هسته‌ای نشان داده شده است.

¹ - Pressurized Water Reactor (PWR)



شکل (۱-۲) شمای کلی یک نیروگاه هسته‌ای

گرمای تولید شده از شکافت سوخت موجود در قلب راکتور^۱، توسط خنک‌کننده برداشت می‌شود. پس از خروج از راکتور، خنک‌کننده از طریق قسمتی از مدار اولیه^۲ که شاخه گرم نامیده می‌شود، به مولد بخار انتقال می‌یابد. مولد بخار یک مبدل حرارتی است که در آن گرمای خنک‌کننده مدار اولیه به آب تغذیه در مدار ثانویه^۳ منتقل شده و تولید بخار می‌کند. پس از مولد بخار، خنک‌کننده از طریق قسمتی از مدار اولیه که شاخه سرد نامیده می‌شود، به داخل راکتور بازگردانده می‌شود. در مدار ثانویه، بخار تولید شده در مولدهای بخار به سایر قسمت‌های نیروگاه منتقل می‌گردد. قسمت اعظم بخار تولید شده در مولدهای بخار به توربین منتقل شده و قسمت کمی از آن برای گرم کردن آب تغذیه استفاده می‌شود. پس از خروج از توربین، بخار وارد چگالنده^۴ شده و به صورت مایع در می‌آید. بعد از چگالنده، آب از طریق گرم‌کننده‌های کم فشار به قسمت هواگیری منتقل می‌شود تا گازهای غیرقابل تبدیل به مایع از آن جدا شوند. پس از قسمت هواگیری، آب تغذیه از طریق گرم

^۱ - Reactor core

^۲ - Primary circuit

^۳ - Secondary circuit

^۴ - Condenser

کننده‌های پر فشار به مولد بخار باز می‌گردد. همانطور که در شکل (۱-۲) ملاحظه می‌شود. میله‌های نئرونی درون راکتور نفوذ داده شده‌اند، سبب تغییر انرژی گرمایی راکتور می‌شوند. مقدار فرآیندهای هسته‌ای توسط میله‌های کنترل موجود در روی راکتور تنظیم می‌شوند. تغییر در انرژی گرمایی تولید شده توسط راکتور سبب تغییر دمای آب موجود در مولد بخار می‌شود، و این موجب تغییر در فلو بخار ورودی توربین می‌شود که نهایتاً منجر به تغییرات قدرت الکتریکی ژنراتور می‌شود [۱۱].

۲-۵-۱ اجزاء یک نیروگاه هسته‌ای

اکثر راکتورهای هسته‌ای موجود در کشور فرانسه از نوع آب تحت فشار^۱ PWR هستند که از دو قسمت زیر تشکیل شده‌اند [۵].

۱- این سیستم در برگیرنده راکتور هسته‌ای، سیستم خنک کننده، سوخت هسته‌ای، سیستم اولیه خنک کننده راکتور، سیستم‌های ایمنی اضطراری، مدارهای ثانویه تولید بخار تا مرحله تحویل به توربین بخار و پاره‌ای از تأسیسات جانبی دیگر است مولد بخار انرژی گرمایی تولید شده حاصل از شکافت هسته‌ای توسط خنک کننده را برداشت می‌کند و به صورت آب فشرده شده به سمت مولد بخار هدایت می‌شود. و طی یک سیکل این روند ادامه دارد. این مدار حلقه بسته مدار اولیه^۲ نامیده می‌شود.

۲- سیستم تبدیل قدرت ترکیب شده از توربین بخار، ژنراتور و چگالنده و بقیه تأسیسات نیروگاه از جمله تأسیسات آبرسانی یا برجهای خنک‌کننده، پست ترانسفورماتور برق، و کلیه تأسیسات دیگری که برای بهره برداری از نیروگاه لازم می‌باشند را در بر می‌گیرد. این مدار حلقه بسته مدار ثانویه^۳ نامیده می‌شود.

1 - Pressure Water Reactor

2 -Primary Circuit

3 - Secondary Circuit

۲-۶ مولد بخار^۱

مولد بخار یک نیروگاه هسته‌ای یک سیستم پیچیده، غیرخطی، نامینیم فاز و متغیر با زمان است، و یکی از اجزای کلیدی نیروگاه، می‌باشد که نقش رابط حرارتی بین خنک‌کننده مدار اولیه راکتور و سیال مدار ثانویه را دارد. نحوه عملکرد مولد بخار به صورت مستقیم روی راکتور هسته‌ای و توربین بخار تأثیر می‌گذارد. بطوریکه اگر مولد بخار نتواند بخار کاملاً خشکی را تولید نماید، ذرات آب موجود در بخار باعث ضربه زدن به پره‌های توربین شده و در نتیجه بعد از مدتی موجب خرابی پره‌های توربین خواهند شد. همچنین اگر مولد بخار نتواند بخوبی حرارت تولید شده توسط راکتور هسته‌ای را برداشت نماید، منجر به کاهش قدرت خنک‌کنندگی راکتور شده و در نهایت موجب خاموش‌سازی راکتور می‌شود. با توجه به این موضوع، بسیار مهم است که بتوانیم سطح آب مولد بخار را در یک محدوده مشخص نگه داریم. زیرا افزایش بیش از حد سطح آب در مولد بخار باعث وارد شدن بخار مرطوب به توربین و کاهش سطح آب باعث کاهش میزان برداشت حرارت از راکتور می‌شود. در حالت اول خرابی پره‌های توربین و در حالت دوم خاموش شدن راکتور را به دنبال خواهد داشت. لذا کنترل سطح آب در داخل مولد بخار مسأله قابل توجهی است [۱۳و۱۲و۱۱].

از دید کنترلی وجود برخی پیچیدگی‌ها از جمله غیرمینیم فاز^۲ بودن سیستم، متغیر بودن دینامیک‌های مولد بخار با توان، غیرخطی بودن شیر آلات به ویژه در توان‌های پایین کنترل سطح آب را دشوار می‌سازد. تغییرات سطح آب مولد بخار وابسته به فلو بخار^۳ خروجی و آب تغذیه^۴ است [۱]. مولد بخار نقش کلیدی و ارتباط دهنده بین مدار اولیه و مدار ثانویه را ایفا می‌کند. وظیفه این واحد، تولید بخار مورد نیاز برای به گردش درآوردن توربین است. انرژی حرارتی حاصل از شکافت در داخل راکتور توسط سیال خنک‌کننده به مولد بخار هدایت می‌گردد و سیال خنک‌کننده در داخل مولد

^۱ - Steam Generator

^۲ - Nonminimom phase

^۳ - Steam Flow

^۴ - Feed Water

بخار انرژی حرارتی خود را به سیال خنک‌کننده ثانویه که برای تولید بخار اشباع مورد استفاده قرار می‌گیرد، منتقل می‌کند. بخار اشباع تولید شده، پس از عبور از جداکننده به صورت بخار خشک وارد توربین شده و با به چرخش درآوردن پره‌های توربین، از طریق ژنراتور انرژی الکتریکی مورد نیاز را تولید می‌کند. در نیروگاه‌های هسته ای PWR برای ایمنی بیشتر معمولاً از ۴ مولد بخار موازی استفاده می‌شود. هر کدام از این حلقه‌ها در برگزیده یک مولد بخار و یک پمپ خنک‌کننده اصلی است. به یکی از حلقه‌ها^۱ یک فشارنده^۲ وصل شده است که وظیفه تنظیم فشار مدار اولیه راکتور را بر عهده دارد. از آنجایی که مولد بخار رابط بین مدار اولیه و مدار ثانویه است، عملکرد آن تأثیر کاملاً مستقیمی روی رفتار مدار اولیه و مدار ثانویه نیروگاه خواهد داشت. در این فصل پس از اشاره کلی به نیروگاه‌های هسته‌ای، به جایگاه مولدهای بخار در آنها خواهیم پرداخت. تأکید اصلی بر روی نیروگاه هسته‌ای و به تبع آن مولدهای بخار افقی بکار رفته در آنها خواهد بود. سپس طرز کار مولدهای بخار بررسی شده، در نهایت، با معادلات اساسی فیزیکی حاکم بر آنها آشنا می‌شویم و یک مدل که می‌تواند برای مدل کردن انواع مولدهای بخار بکار رود، ارائه خواهد شد [۹-۱۴].

۲-۶-۱ طبقه بندی انواع مولدهای بخار

مولدهای بخار را از چند جهت می‌توان تقسیم‌بندی کرد،

- ۱ - شکل لوله عبور آب مدار اولیه، که می‌تواند U شکل^۳ یا مستقیم باشد.
- ۲ - شکل قرارگیری سیستم، که مولد بخار را به انواع افقی و عمودی تقسیم می‌کند.
- ۳ - بسته به اینکه خنک‌کننده در مدار اولیه از چه نوعی باشد، مولد بخار به سه نوع تقسیم می‌شود. معمولاً در راکتورهای هسته‌ای از سه ماده زیر به عنوان خنک‌کننده استفاده می‌شود.

1- Loop
2 - Pressurizer
3 - U-Tube

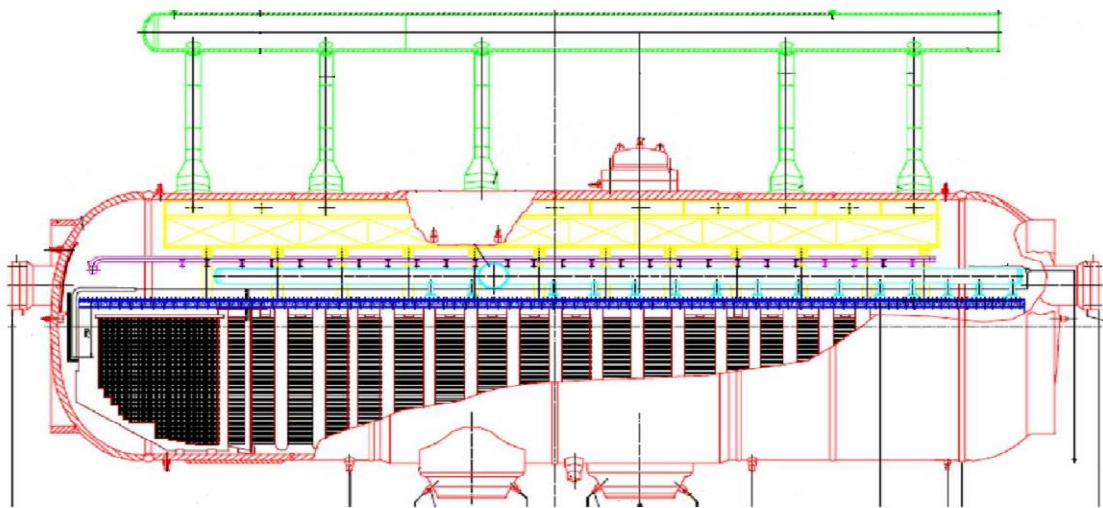
- فلزات مذاب (سدیم مذاب)

- آب (آب معمولی و آب سنگین)

- گاز (دی اکسید کربن، هلیوم)

۲-۶-۲ مولدهای بخار افقی^۱

شکل (۲-۲) نمای برش یافته یک مولد بخار افقی را نشان می‌دهد. محفظه مولد بخار با رنگ قرمز مشخص شده است. صفحه سوراخدار و لوله‌های آب تغذیه به ترتیب با رنگ آبی پررنگ و آبی نشان داده شده‌اند. خنک کننده مدار اولیه از طریق مجموعه لوله‌های افقی که با رنگ سیاه نشان داده شده‌اند، در مولد بخار جریان می‌یابد. قسمت زرد رنگ جداکننده مکانیکی^۲ می‌باشد. در قسمت بالایی مولد بخار، جمع کننده بخار واقع شده و با رنگ سبز مشخص شده است. از طریق این جمع کننده، بخار تولید شده به دریچه خروجی بخار هدایت شده و به طرف توربین می‌رود [۱۱].



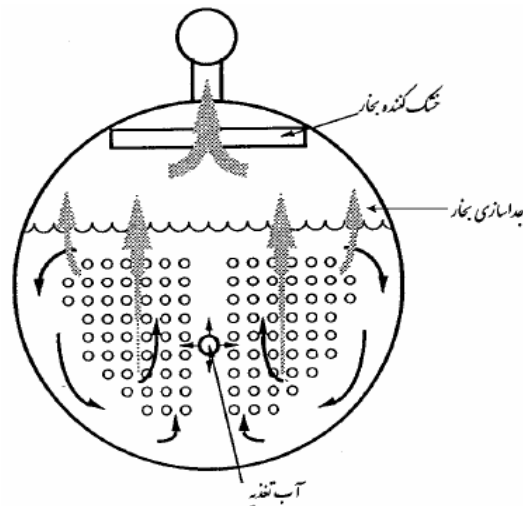
شکل (۲-۲) نمای برش یافته یک مولد بخار افقی

1 - Horizontal Steam Generator
2 - Mechanical Separator

۳-۶-۲ طرز کار مولدهای بخار

۱-۳-۶-۲ بررسی الگوی جریان در مولد های بخار WWER- 440

در مولدهای بخار افقی، الگوی جریان مدار ثانویه بسیار پیچیده‌تر از مولدهای بخار عمودی است [۱۵]. در شکل (۳-۲) الگوی جریان در یک مولد بخار WWER- 440، نشان داده شده است.



شکل (۳-۲) الگوی جریان در یک مولد بخار WWER- 440

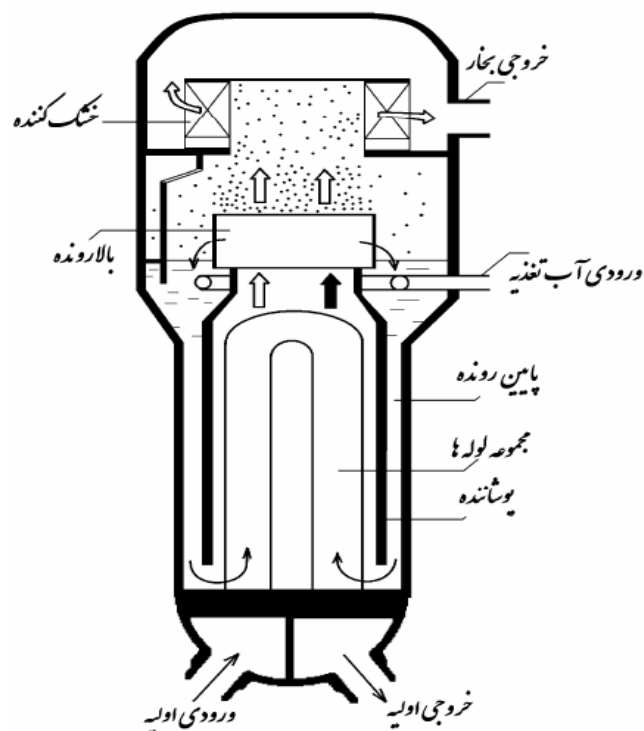
در این حالت، فضای بین مجموعه لوله‌ها تا خشک کننده بخار باز بوده و محل تزریق آب تغذیه در زیر صفحه میانی مقطع لوله‌ها قرار گرفته است. این ساختار در بسیاری از مولدهای بخار صنعتی یکسان می باشد. در این نوع قرارگیری، الگوی جریان تقریباً واضح می‌باشد. ترکیب دو فاز بخار مایع از بین لوله‌ها به طرف بالا حرکت کرده و آب جدا شده به قسمت پیرامونی و نواحی ورودی بین لوله باز می‌گردد. الگوی جریان کاملاً مشخص بوده و دارای دو جریان چرخشی^۱ عمده می‌باشد [۱۶].

۲-۳-۶-۲ بررسی الگوی جریان در مولد های بخار عمودی

ساختار یک مولد بخار عمودی با لوله‌های U شکل، در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. این مجموعه از دو سیستم سیال در تماس با هم تشکیل می‌شود: سیستم سیال گرم مدار اولیه و

¹ - Rotatory Circuit

سیستم سیال سردتر مدار ثانویه. طرفهای اولیه و ثانویه توسط جداره لوله‌ها و از طریق انتقال حرارت در تماس با یکدیگر هستند. سیستم سیال اولیه، از خنک کننده داغ راکتور درون لوله‌های U شکل، مجموعه لوله‌ها و خنک کننده واقع در دریچه‌های ورودی و خروجی واقع در زیر مولد بخار، تشکیل می‌شود. آب داغ راکتور از طریق دریچه ورودی اولیه وارد مولد بخار شده، سپس در داخل لوله‌های U شکل جریان یافته و با حرکت رو به بالا و رو به پایین در مجموعه لوله‌ها، گرما را به سیال مدار ثانویه منتقل می‌کند. خنک کننده در نهایت از طریق دریچه خروجی از مولد بخار خارج می‌شود [۱۷].



شکل (۲-۴) شمای یک مولد بخار عمودی

سیال ثانویه دارای دو ناحیه مجزا می‌باشد: ناحیه جریان رو به بالا و ناحیه جریان رو به پایین. این دو ناحیه توسط یک پوشاننده از هم جدا می‌شوند که در آن، قسمت داخلی (ناحیه جریان رو به بالا)

شامل مجموعه لوله‌ها و بالارونده^۱ و قسمت خارجی (ناحیه جریان رو به پایین) شامل پایین‌رونده^۲ و ناحیه ورود آب تغذیه می‌شود. آب تغذیه سرد از طریق نازل آب تغذیه وارد مولد بخار شده و در ناحیه تقسیم آب تغذیه و توسط حلقه آب تغذیه توزیع می‌شود. در این قسمت، آب تغذیه با سیال اشباع بازگشتی از قسمت‌های جدا کننده بخار ترکیب می‌شود. این سیال ترکیب شده خنک، از ناحیه استوانه‌ای حلقوی پایین رونده، بین پوشاننده^۳ و جداره خارجی مولد بخار، به سمت پایین جریان می‌یابد. در قسمت ابتدایی پایین رونده، آب با تغییر مسیر در قسمت خارجی جداره لوله‌ها به طرف بالا حرکت کرده و در این ناحیه با گرم شدن به حالت اشباع رسیده و شروع به جوشیدن می‌کند. سیال مدار ثانویه، از ناحیه مجموعه لوله‌ها به صورت ترکیب اشباع^۴ دو فازي خارج شده و با جریان یافتن به سمت بالا از طریق بالارونده، وارد قسمت جدا کننده بخار می‌شود. جدا سازی بخار، توسط مجموعه‌ای مرکب از جدا کننده‌های بخارگریز از مرکز، به منظور جداسازی کلی سیال - بخار و خشک کننده‌های بخار زیگزاگ مانند به منظور برداشت رطوبت باقیمانده، انجام می‌شود. بخار نسبتاً خشک، از طریق دریچه خروجی بخار واقع در بالای مولد بخار خارج شده و آب اشباع به سمت پایین هدایت می‌شود تا با آب تغذیه ورودی دوباره ترکیب گردد. میزان انتقال حرارت در مولد بخار، متناسب با اختلاف دمای خنک کننده اولیه و دمای اشباع ثانویه می‌باشد، هرگونه تغییری در فشار مدار ثانویه منجر به تغییر در نرخ انتقال حرارت از اولیه به ثانویه می‌شود.

برای مثال، افزایش بار را می‌توان با افزایش دمای ورودی اولیه و دبی آب تغذیه همراه با کاهش فشار ثانویه تأمین کرد. مسیر سیال مدار ثانویه، یک حلقه طبیعی از جریان سیال را تشکیل می‌دهد. عامل محرک این جریان گردشی از اختلاف چگالی بین ستون سیال سرد در ناحیه پایین رونده و ترکیب دو فازي واقع در قسمت خارجی مجموعه لوله‌ها و بالا رونده ناشی می‌شود. این عامل محرک با

¹ Riser

² Downcomer

³ Wrapper

⁴ - Saturation

اتلافهای فشار مختلف در حلقه، مانند تلفات ناشی از اصطکاک در مجموعه لوله‌ها و تلفات درون مولد بخار برابری می‌کند. تغییرات بار مولد بخار با لوله‌های U شکل، منجر به تغییر فشار ثانویه، دمای خنک کننده ورودی در مدار اولیه، دبی آب تغذیه و دمای آب تغذیه می‌شود [۱۷].

۷-۲ بررسی نقش مولد های بخار در گذرهای عملیاتی

رفتار مولد بخار به تنهایی بعنوان مسأله ایمنی مهمی در گذرهای دینامیکی محسوب نمی‌شود. اما اگر رفتار مولد بخار به خوبی درک نشود، می‌توان به نتایج غلطی در این زمینه دست یافت. در برخی گذرها، انواع مختلف مولدهای بخار پاسخ‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال، در مولد های بخار عمودی، جریان شاخه گرم تنها در صورتی بدون خنک شدن به شاخه سرد خواهد رسید که قسمت ثانویه مولد بخار به طور کامل خشک شود. در مولد های بخار افقی تحقق این امر تنها در صورتی ممکن است که فقط لوله‌های قسمت‌های بالایی به طور کامل خشک شوند. مولد های بخار در محدوده قدرت صفر تا صد درصد قلب باید بتواند به صورت پایدار کار کنند [۱۸]. البته این امر مستلزم وجود شرایط نرمال زیر می‌باشد:

- ۱- پمپ‌های خنک کننده قلب راکتور کار کنند.
 - ۲- تزریق آب تغذیه، سطح آب مولد بخار را در مقدار ثابتی نگه دارد.
- در گذرهای دینامیکی، شرایط عملکرد عادی ممکن است از طریق هر یک از شرایط زیر مختل گردد:

- ۱- جریان اجباری معکوس^۱ در طرف مدار اولیه پدید آید.
- ۲- جریان گردشی تک فاز طبیعی در سمت اولیه پدید آید.
- ۳- سطح بالای آب (بالتر از حد مجاز) به دلیل تزریق اضافی آب تغذیه.

¹ - Inverse

۴- کاهش سطح آب در مولد بخار به دلیل کاهش تزریق آب تغذیه و یا وجود نشت در مدار ثانویه.

۵- افزایش فشار در سمت ثانویه به دلیل بسته شدن شیر جداسازی خط اصلی بخار.

۶- کاهش دمای آب تغذیه به دلیل از کار افتادن پیش گرم‌کننده^۱.

۷- افزایش فشار مدار اولیه.

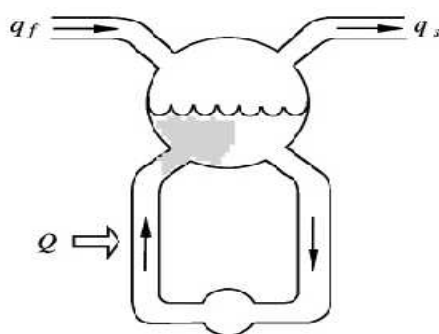
جدول (۱-۲) مشخصات اصلی مولد بخار افقی نیروگاه WWER-1000 [۱۹]

۱۰۰mm	ارتفاع سطح آب
۷۵۰MW	قدرت حرارتی
۲۱۲۰۰ m ³ /h	دبی آب مدار اولیه
۲۸۹.۸ °C	درجه حرارت آب خروجی در مدار اولیه
۳۲۰.۱ °C	درجه حرارت آب ورودی در مدار اولیه
۱۵.۷ Mpa	فشار کاری آب مدار اولیه
۱۷.۷ Mpa	فشار طراحی آب مدار اولیه
۳۵۰ °C	درجه حرارت طراحی آب مدار اولیه
۶.۳ Mpa	فشار بخار اشباع در SG
۷.۹ Mpa	فشار طراحی مدار ثانویه
۲۲۰ °C	درجه حرارت آب تغذیه در قدرت نامی
۲%>	رطوبت بخار بعد از SG

¹ - Warmer

۱۱۶۰۰	تعداد لوله‌های انتقال دهنده حرارت
۱۱.۱m	طول متوسط لوله‌ها
۱۶.۱۳ mm	قطر داخلی/خارجی لوله‌ها
۳.۱۵ m	ارتفاع آب تغذیه داخل ورودی نازل
۳۲۲ tone	وزن خشک
۱۲۷ m ³	حجم آب داخل SG
۲۱ m ³	حجم آب مدار اولیه در SG
۴۰۸ kg/s	دبی نامی بخار
۲	تعداد کلکتورها
۲.۴ m ³	حجم هر کلکتور

شمای کلی یک مولد بخار در شکل (۵-۲) نشان داده شده است.



شکل (۵-۲) شمای کلی یک مولد بخار

گرمای Q منتقل شده به قسمت بالا رونده باعث جوشش می‌شود. آب تغذیه q_f به مولد بخار تزریق شده و بخار اشباع شده q_s از مولد بخار خارج شده و به سمت توربین می‌رود. وجود بخار در

زیر سطح آب، باعث ایجاد پدیده‌های انبساط و انقباض^۱ شده و باعث مشکل شدن کنترل سطح آب در مولد بخار می‌شود. سیستم نشان داده شده در شکل (۲-۵) نمای ساده شده ای از هندسه واقعی و پیچید مولد بخار است. مولد بخار دارای لوله‌های بسیار زیادی در قسمت پایین رونده و بالا رونده می‌باشد. جریان خروجی از قسمت بالا رونده از یک جدا کننده عبور می کند تا آب موجود در بخار از آن جدا شود. برخلاف پیچیدگی سیستم، رفتار کلی آن را می توان با نوشتن معادلات کلی جرم و انرژی بدست آورد. تمامی قسمت‌های سیستم که در تماس با ترکیب مایع - بخار اشباع هستند، در حالت تعادل نرمال خواهند بود. انرژی ذخیره شده در بخار و آب، سریعاً در هنگام تغییر فشار آزاد و یا جذب می‌شود. آزاد شدن سریع انرژی این اطمینان را می‌دهد که قسمت‌های مختلف مولد بخار به طریق مشابهی دمای خود را تغییر می‌دهند. به همین علت دینامیک مولد بخار را می‌توان با مدل-هایی از درجه پایین تقریب زد.

از طرز قرار گیری قسمت ثانویه مولدهای بخار می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱- در جریان گردشی آزاد بدون صفحه سوراخدار و پوشش آن که به عنوان میراکننده^۲

جریان عمل می‌کنند، ورود آب بسیار قوی بوده و باعث وارد آمدن آسیب جدی به خشک‌کننده^۳ می‌شود.

۲- انبساط سطح آب در نزدیکی شاخه گرم، شدیدتر از نزدیکی شاخه سرد می‌باشد. به همین علت محل تزریق آب تغذیه در قسمت نزدیک به شاخه گرم واقع شده تا انبساط سطح آب را تا حد ممکن کاهش دهد.

۳- اصطکاک در سوراخها باعث ایجاد کاهش فشار قابل ملاحظه‌ای می‌شود.

^۱ - Swell And Shrink

^۲ - Damper

^۳ - Drier

۸-۲ نتیجه گیری :

در این فصل به بررسی چگونگی غنی‌سازی اورانیم، شکافت هسته‌ای، ساختار نیروگاه‌های هسته‌ای و کارهایی که در این زمینه انجام شده است پرداخته شد. همچنین طرز کار و اهمیت مولدهای بخار افقی و اجزاء تشکیل دهنده آنها مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه با انواع مولدهای بخار و بررسی نقش مولدهای بخار در گذرهای عملیاتی آشنا شدیم.

فصل سوم

طراحی کنترل کننده کلاسیک برای مولدهای بخار

در فصل قبل به جایگاه مولدهای بخار در نیروگاه‌های هسته‌ای قدرت و طرز کار آنها اشاره شد. در این فصل پس از در نظر گرفتن مدلی ریاضی برای مولدهای بخار که برای مقاصد کنترلی مدلی مناسب محسوب می‌شود. به بررسی مشکلات موجود در زمینه کنترل سطح آب خواهیم پرداخت. از کنترل کننده‌های کلاسیک P, PI, PD, PID می‌توان برای جبران‌سازی استفاده کرد. از کنترل‌کننده PI می‌توان برای حذف خطای حالت ماندگار استفاده کرد. در ادامه با کنترل‌کننده‌های کلاسیک (تناسبی - انتگرالی PI) به عنوان متداول‌ترین کنترل‌کننده‌های موجود برای کنترل پروسه‌های صنعتی آشنا شده، سپس به طراحی کنترل‌کننده‌های PI برای دستیابی به شرایط مورد نیاز برای مولدهای بخار پرداخته و با مشکلات و محدودیت‌های موجود اشاره خواهیم کرد.

۳-۲ مدل ریاضی مولد های بخار

مولدهای بخار دارای معادلات دینامیکی بسیار غیرخطی بوده و تابع نقطه کار آن می باشد. برای طراحی کنترل‌کننده داشتن مدلی نسبتاً ساده از مولد بخار که بتواند دینامیک‌های اساسی حاکم بر آن را نشان داده و رفتارهای مورد انتظار از سیستم را به خوبی منعکس کند امری ضروری است. مدل های زیادی برای مولد بخار وجود دارد که مدل ارائه شده در این رساله بطور گسترده استفاده شده است. می‌توان گفت در اکثر کارهای برجسته انجام گرفته برای طراحی کنترل‌کننده مولدهای بخار در دهه اخیر از مدل پیشنهادی اروینک [۲۰] استفاده شده است. این مدل با دارا بودن تمامی شرایط گفته شده مدلی بسیار مطلوب به منظور طراحی کنترل‌کننده برای مولد بخار به شمار می‌رود. مدل ارائه شده دارای دو ورودی دبی آب تغذیه q_e و دبی بخار خروجی q_v بوده و خروجی آن نیز مقدار سطح آب در مولد بخار y ، در نظر گرفته می شود. در رابطه زیر تابع تبدیل این مدل نشان داده شده است.

(۱-۳)

$$Y(s) = \left(\frac{G_1}{s}\right)[(q_e(s) - q_v(s))] - \left(\frac{G_2}{1+\tau_2 s}\right)[(q_e(s) - q_v(s))] + \left(\frac{G_3 s}{s^2 + 2\tau_1^{-1}s + \tau_1^{-2} + 4\pi^2 T^{-2}}\right) q_e(s)$$

جمله اول رابطه (۱-۳)، $\left(\frac{G_1}{s}\right)$ نشان دهنده این مطلب می باشد که سطح آب موجود در مولد بخار، تابع اختلاف دبی آب تغذیه ورودی و دبی بخار خروجی می باشد، این جمله مطابق انتظار مستقل از قدرت کاری مولد بخار می باشد. جمله دوم رابطه بالا $\left(\frac{G_2}{1+\tau_2 s}\right)$ در اثر تغییرات فلو بخار خروجی و آب تغذیه پدیدار می شود، خاصیت انبساط و انقباض در مولد بخار را مدل کرده و باعث ایجاد یک صفر ناپایدار و اثر غیر مینیمم فاز در تابع تبدیل می شود. این جمله که از جمله اول کم می شود، نشان می دهد که تغییرات سطح آب در ابتدا در خلاف جهت ورودی اعمالی بوده و ثابت زمانی آن τ_2 می باشد. پس از گذشت زمانی معادل با پنج برابر این ثابت زمانی، تاثیر آن بر پاسخ گذرای سیستم به مقدار ثابتی می رسد.

جمله سوم رابطه بالا $\left(\frac{G_3 s}{s^2 + 2\tau_1^{-1}s + \tau_1^{-2} + 4\pi^2 T^{-2}}\right)$ نیز نوسانات مکانیکی سطح آب ناشی از تغییرات دبی آب تغذیه ورودی را لحاظ می کند، به این ترتیب که پس از مثلاً افزایش دبی آب تغذیه ورودی شاهد نوساناتی در سطح آب مولد بخار خواهیم بود. از تحلیل این جمله می توان دریافت که دوره تناوب این نوسانات مکانیکی برابر T ثانیه بوده و با ثابت زمانی τ_1 میرا شده و از بین می روند. پارامترهای مولد بخار، از داده های تجربی بدست آمده اند. مقادیر پارامترهای رابطه (۱-۳) به عنوان تابعی از قدرت حرارتی مولد بخار، در جدول (۱-۳) نشان داده شده است. واحد این پارامترها در کنار نام آنها مشخص شده و سطح آب را بر حسب میلی متر بدست می دهند [۳].

جدول (۳-۱) مقادیر پارامترهای مولد بخار در قدرت‌های مختلف [۳]

Power level p (%)	5	15	30	50	100
G_1	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058
G_2	9.63	4.46	1.83	1.05	0.47
G_3	0.181	0.226	0.310	0.215	0.105
τ_1	41.9	26.3	43.4	34.8	28.6
τ_2	48.4	21.5	4.5	3.6	3.4
T	119.6	60.5	17.7	14.2	11.7
q_D	57.4	180.8	381.8	660.0	1435.0

اگر بتوان یک مدل دینامیکی را بر مبنای اصول و پارامترهای فیزیکی طراحی نمود که پدیده‌های غیر خطی موجود در یک سیستم را به خوبی نشان دهد، می‌توان از آن برای بررسی مشخصه‌های مهم کارکرد بهره گرفت [۲۱]. در مولدهای بخار پارامترهای مختلفی از جمله فشار بخار خروجی مافوق گرم‌کن‌ها^۱، دمای بخار، سطح آب استوانه^۲، میزان آلودگی ناشی از احتراق و ... کنترل می‌گردد. اما پیچیده‌ترین کنترل مربوط به فشار بخار و مخصوصاً سطح آب استوانه می‌باشد به طوری که در بعضی از نیروگاه‌ها حدود ۳۰ درصد از توقف‌های اضطراری مربوط به کنترل ضعیف سطح آب استوانه مولد بخار می‌باشد.

طی سالیان اخیر، افراد مختلفی، مدل‌هایی گوناگون از ساده تا پیچیده را بر مبنای تئوری و آزمایش برای مولد بخار ارائه کردند، Astrom به همراه Bell و Eklund ابتدا یک مدل ساده غیرخطی برای فشار مولد بخار با استفاده از پاسخ‌های تجربی ارائه کردند [۲۲ و ۲۳]. سپس طی سالها تحقیق و بررسی، این مدل را توسعه دادند و با دخالت دادن پارامترهای فیزیکی و حرارتی بیشتر، مدل‌های واقعی‌تری از مرتبه‌های دو، سه و چهار به دست آوردند [۲۴]. در نهایت یک مدل کلی برای بررسی

¹ - Main Steam (or Throttle) Pressure

² - Drum water level

سطح آب و فشار استوانه مولد بخار ارائه کردند و آن را یک مدل کامل نامیدند. در این مدل، تاثیر پدیده انبساط و انقباض بخار موجود در سیستم، به خوبی نشان داده شده است. O'Malley و Flynn برای مدل کردن سطح آب و فشار استوانه از معادلات ساده مرتبه دو استفاده کردند اما در عوض مدلی از شیرهای کنترل و کوره را نیز در کار خود دخالت دادند [۲۵]. Adam و Marchetti برای مدل سازی دینامیک سطح آب استوانه از معادلات حاکم بر جدایش فازها در یک جریان دو فازی بهره گرفتند. علاوه بر این، معادلات مربوط به فشار استوانه و انتقال حرارت در کوره را نیز به مدل افزودند. De Mello نیز در کار خود به مدل کردن سطح آب و فشار استوانه، و مافوق گرم کن ها پرداخت که البته از توزیع بخار در استوانه، که بر دینامیک سطح آب استوانه تاثیر اساسی می گذارد، صرف نظر نمود [۲۶]. در واقع در این مدل سیال موجود در زیر سطح، تماماً مایع فرض شده است. در اینجا، ابتدا به استخراج معادلات دینامیکی مربوط به فشار بخار خروجی مافوق گرم کن ها و سطح آب استوانه پرداخته شده است. برای مدل سازی استوانه، لوله های پایین آورنده^۱ و بالا برنده^۲ از [۲۷] استفاده شده است. اما در معادلات مربوط به توزیع بخار در استوانه که در [۲۷] ارائه شده است، یکی از پارامترها مبهم تعریف شده و تعیین یکی دیگر از آنها به پاسخ تجربی وابسته است. به همین دلیل برای مدلسازی توزیع بخار در استوانه، از مدل توزیع بخار ارائه شده در [۲۸ و ۲۹] بهره گرفته شده است. در واقع یک ترکیب قوی تر از مدل های [۲۷ و ۲۸] مد نظر قرار گرفته است تا همه پارامتر های لازم برای تعریف مدل، صرفاً فیزیکی باشند. برای شبیه سازی مافوق گرم کن ها از [۲۶] استفاده شده است. برای کوره و شیرهای کنترل، مدل هایی ساده به کمک [۲۶ و ۲۹ و ۳۰] در مدل کلی گنجانده شده است.

^۱ - Downcomers

^۲ - Risers

۳-۲-۱ بررسی مدل مولد بخار

مولد بخار نیروگاهی، متشکل از اجزاء مختلفی نظیر صرفه‌جو^۱، استوانه بخار، مافوق گرم‌کن^۲، و ... می باشد. مطابق با شکل (۳-۱)، آب که از پمپ‌های آب تغذیه^۳ با فشار بالا خارج شده و در صرفه-جو تقریباً به مایع اشباع تبدیل شده است، وارد استوانه بخار می‌شود. آب توسط لوله‌های عایق پایین آورنده که در خارج از کوره قرار گرفته‌اند، از استوانه به مقسم پایینی^۴ جریان می‌یابد. مقسم به لوله-های بالابرنده که دیواره‌های کوره را پوشانده‌اند، مربوط می‌شود. آب موجود در لوله‌ها گرما را از گاز-های حاصل از احتراق دریافت می‌کند و تبخیر می‌شود.

اکنون مخلوط دو فازی وارد استوانه می‌شود و در آنجا بخار از مایع جدا شده و به مافوق گرم‌کن‌ها می‌رود. اگر گردش آب در حلقه لوله‌های پایین آورنده و بالابرنده، فقط ناشی از اختلاف چگالی بخار و مایع باشد، آن را گردش طبیعی^۵ می‌نامند [۳۱]. کنترل سطح آب، بوسیله کنترل‌کننده‌های مناسب در مولد بخار انجام می‌گیرد تا به این ترتیب از پایین آمدن بیش از حد سطح آب که خطرناک است و یا از انتقال ذرات مایع به همراه بخار به مافوق گرم‌کن‌ها جلوگیری شود. به طور مثال برای استوانه یک مولد بخار با ظرفیت تولید بخار ۲۲ کیلوگرم بر ثانیه، تغییر سطح آب نباید از تجاوز $\pm 250 \text{ mm}$ نماید.

با توجه به شکل (۳-۱)، برای مدل سازی، کل سیستم مولد بخار را ترکیبی از چند زیرسیستم در نظر می‌گیریم. استوانه بخار، لوله‌های پایین آورنده و لوله‌های بالابرنده، زیرسیستم اول را تشکیل می‌دهند. زیرسیستم دوم نیز از لوله‌های واسط بین استوانه و مافوق گرم‌کن‌ها، و بقیه لوله‌ها تا شیر کنترل بخار خروجی، تشکیل می‌شود. کوره، شیر کنترل بخار خروجی و شیر کنترل آب تغذیه به ترتیب زیرسیستم‌های سوم و چهارم و پنجم در نظر گرفته شده‌اند.

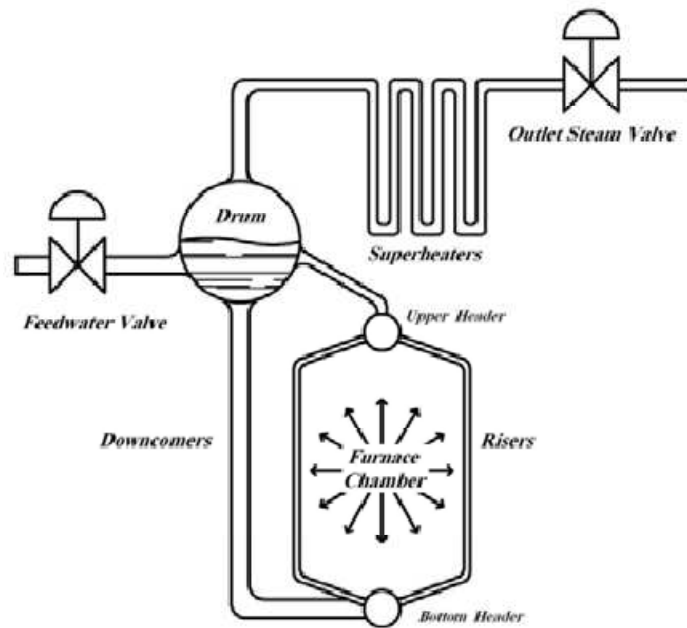
¹ -Economizer

² - Superheater

³ - Feedwater

⁴ - Header

⁵ - Natural Circulation



شکل (۱-۳) اجزاء موثر بر دینامیک مولد بخار

۳-۱-۲-۱ مدل سازی زیرسیستم اول:

اکنون به موازنه جرم و انرژی زیرسیستم اول می پردازیم. ورودی های زیرسیستم عبارتند از: نرخ انتقال حرارت، دبی جرمی آب تغذیه و دبی جرمی بخار خروجی از استوانه. خروجی های زیرسیستم را نیز می توان فشار بخار و سطح آب استوانه در نظر گرفت.

۳-۱-۲-۲ موازنه جرم و انرژی کلی برای زیر سیستم اول

برای موازنه جرم خواهیم داشت [۳۲]:

$$\frac{d}{dt}[\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}] = \dot{m}_f - \dot{m}_d \quad (2-3)$$

که در آن ρ_s و V_{st} به ترتیب چگالی و حجم کل بخار اشباع موجود در زیرسیستم اول، ρ_w چگالی و V_{wt} حجم کل مایع اشباع در زیرسیستم اول، $\dot{m}_f$ دبی جرمی آب تغذیه و $\dot{m}_d$ دبی جرمی بخار خروجی از استوانه می باشند.

برای موازنه انرژی خواهیم داشت [۳۲]:

$$\frac{d}{dt}[\rho_s u_s V_{st} + \rho_w u_w V_{wt} + M_t C T_{sat}] = \dot{Q} + \dot{m}_f h_f - \dot{m}_d h_s \quad (3-3)$$

که در آن u_s انرژی داخلی بخار اشباع، u_w انرژی داخلی مایع اشباع، T_{sat} دمای اشباع، M_t جرم کل بدنه‌های فلزی زیرسیستم اول (مجموع جرم استوانه، لوله‌های پایین آورنده و لوله‌های بالا برنده)، C ظرفیت حرارتی فلزها، $\dot{Q}$ نرخ انتقال حرارت دریافت شده توسط لوله‌های بالا برنده از گازهای داغ محفظه احتراق، h_f آنتالپی آب تغذیه و h_s آنتالپی بخار اشباع خارج شده از استوانه می‌باشند. هر دو معادله به دست آمده مرتبه اول هستند. برای انتخاب دو متغیر حالت بهتر است فشار استوانه p_d و حجم آب کل V_{wt} را انتخاب نمائیم. بنابراین می‌توان دو معادله اخیر را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{d}{dt}[\rho_s V_t + \rho_{ws} V_{wt}] = \dot{m}_f - \dot{m}_d \quad (4-3)$$

$$\frac{d}{dt}[\rho_s u_s V_t + \rho_{ws} u_w V_{wt} + M_t C T_{sat}] = \dot{Q} + \dot{m}_f h_f - \dot{m}_d h_s \quad (5-3)$$

که در این دو معادله

$$V_t = V_{wt} + V_{st} \quad (6-3)$$

$$\rho_{ws} = \rho_w - \rho_s \quad (7-3)$$

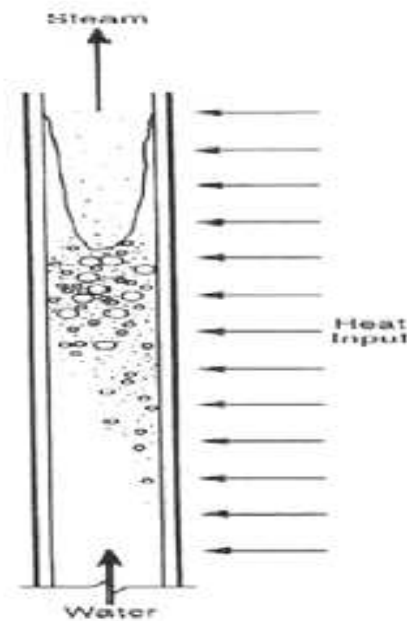
$$\rho u_{ws} = \rho_w u_w - \rho_s u_s \quad (8-3)$$

در این دو معادله h_s , T_{sat} , ρu_{ws} , u_s , ρ_{ws} , $\rho_s u_s$, ρ_s به حالت دو فازی آب و بخار مربوط می‌شوند، و فقط به فشار استوانه بستگی دارند. V_t حجم کل زیرسیستم اول می‌باشد. تاکنون زیرسیستم اول مدل شده است و با مدل سازی زیرسیستم دوم می‌توان ادعا کرد که دینامیک موثر بر فشار بخار خروجی مافوق گرم‌کن‌ها مدل شده است. اما از طرف دیگر، برای مطالعه دینامیک سطح آب استوانه، این معادلات کافی نیست. در حقیقت، برای دستیابی به مدلی که بتواند رفتار سطح استوانه را توصیف

کند باید توزیع آب و بخار را در کل زیرسیستم اول بررسی کرد. زیرا باز توزیع آب و بخار در زیرسیستم اول، موجب پدیده انبساط و انقباض در بخار می‌شود. به این ترتیب استخراج معادلات را با بررسی دینامیک آب و بخار در لوله های بالا برنده و استوانه ادامه می‌دهیم.

۳-۱-۲-۳ موازنه جرم و انرژی در لوله های بالا برنده

در شکل (۲-۳) لوله های بالا برنده را مشاهده می‌کنید. که به آنها دیوارهای آبی^۱ نیز گفته می‌شود، و به دیواره چسبیده اند.



شکل (۲-۳) تبخیر آب در لوله بالا برنده

اگر معادلات موازنه جرم و انرژی را برای لوله های بالا برنده بنویسیم [۳۲]

1 -Waterwalls

به ترتیب خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} [\rho_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r] = \dot{m}_{dc} - \dot{m}_r \quad (9-3)$$

که در آن حجم لوله‌های بالابرنده، $\bar{\alpha}_v$ جزء بخار میانگین در کل لوله‌های بالابرنده، $\dot{m}_{dc}$ دبی جرمی دریافتی از لوله‌های پایین آورنده و $\dot{m}_r$ دبی جرمی خروجی از لوله‌های بالابرنده می باشند،

$$\frac{d}{dt} [\rho_s u_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w u_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r + M_r C T_{sat}] = \dot{Q} + \dot{m}_{dc} h_w - \dot{m}_r (h_w + x_r h_{ws}) \quad (10-3)$$

که در آن $\dot{m}_r$ جرم کل لوله‌های بالابرنده، h_w آنتالپی مایع اشباع، h_{ws} اختلاف آنتالپی بخار و مایع اشباع، $\dot{Q}$ نرخ حرارت داده شده به لوله‌های بالابرنده و x_r کیفیت بخار خروجی از لوله‌های بالابرنده می باشند. در معادله اخیر، دو پارامتر x_r و $\bar{\alpha}_v$ به هم مرتبط هستند. ارتباط این دو پارامتر را باید از معادلات مشتق جزئی به دست آورد. مطالعات و آزمایشات گوناگون نشان داده است اگر ارتباط این دو، از معادلات مشتق جزئی حاکم بر لوله‌های تحت شار گرما، در حالت ماندگار استخراج شود، جواب همخوانی قابل قبولی با داده‌های تجربی دارد. پس با نوشتن معادلات مشتق جزئی بقای جرم و انرژی برای یک لوله که در معرض حرارت یکنواخت است [۲۷]، خواهیم داشت.

$$x_r = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} h_{ws}} \quad (11-3)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\rho_w}{\rho_{ws}} \left[1 - \frac{\rho_s}{\rho_{ws} x_r} \ln \left(1 + \frac{\rho_{ws}}{\rho_s} x_r \right) \right] \quad (12-3)$$

که در این دو معادله $\dot{Q}$ گرمای یکنواخت داده شده به لوله، $\dot{m}$ دبی جرمی، x_r کیفیت جریان دو فازی خروجی از لوله و $\bar{\alpha}$ جزء بخار میانگین در کل لوله می‌باشند. هر دو معادله دینامیکی اخیر، مرتبه اول هستند. برای انتخاب دو متغیر حالت سوم و چهارم بهتر است جزء بخار کل $\bar{\alpha}_v$ و جرم خروجی از لوله ها $\dot{m}_r$ انتخاب گردد.

بنابراین می توان معادلات جرم و انرژی لوله ها را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$V_r \frac{d}{dt} [\rho_w - \bar{\alpha}_v \rho_{ws}] = \dot{m}_{dc} - \dot{m}_r \quad (۱۳-۳)$$

$$\frac{d}{dt} [V_r \rho_w u_w - \bar{\alpha}_v \rho u_{ws} + M_r C T_{sat}] = \dot{Q} + (\dot{m}_{dc} - \dot{m}_r) h_w + \dot{m}_r x_r \quad (۱۴-۳)$$

۳-۲-۱-۴ جریان جرم در گردش طبیعی

معادله موازنه مومنتوم برای حلقه لوله های پایین آورنده و بالا برنده به صورت زیر نوشته می شود:

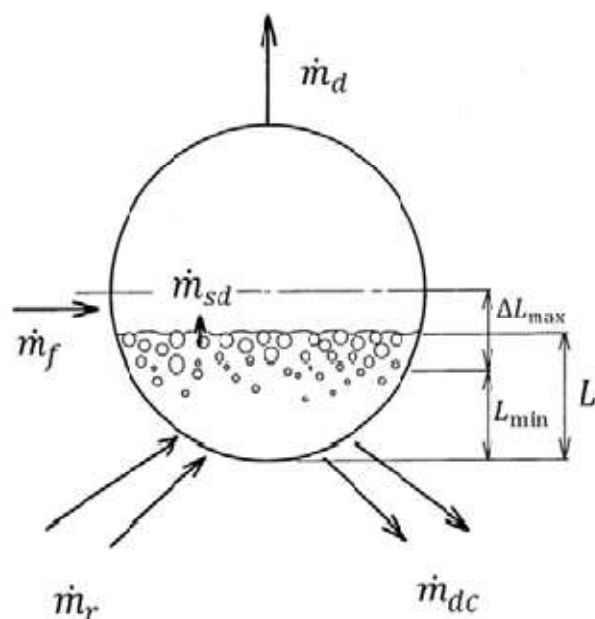
$$(L_{dc} + L_r) \frac{d\dot{m}_{dc}}{dt} = \rho_{ws} \bar{\alpha}_v V_r g - \frac{k \dot{m}_{dc}^2}{2 \rho_w A_{dc}} \quad (۱۵-۳)$$

که در آن L_{dc} و L_r به ترتیب طول لوله پایین آورنده و بالا برنده، A_{dc} سطح مقطع لوله پایین آورنده، g شتاب جاذبه و k ضریب اصطکاک معادل برای افت های ناشی از اصطکاک و اتصالات در لوله می باشند. این معادله مرتبه اول می باشد و معمولاً ثابت زمانی آن در مقایسه با پاسخ کل مولد بخار در داده های تجربی، ناچیز است و می توان این معادله را مستقل از زمان در نظر گرفت [۳۲]. پس معادله اخیر به یک معادله جبری تبدیل و به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{m}_{dc}^2 = \frac{2}{k} \rho_w A_{dc} \rho_{ws} \bar{\alpha}_v V_r g \quad (۱۶-۳)$$

۳-۲-۱-۵ توزیع بخار در استوانه

برای درک بیشتر، شکل (۳-۳) را در نظر بگیرید.



شکل (۳-۳) مخلوط دو فازی و جدایش مایع و بخار در استوانه

فرایندی که در استوانه اتفاق می‌افتد بسیار پیچیده است. جریان دو فازی آب و بخار از لوله‌های بالا برنده، و آب تقریباً اشباع از لوله‌های آب تغذیه وارد استوانه می‌شوند. مکانیزم کلی، جدایش فاز بخار و آب می‌باشد که در زیر سطح استوانه اتفاق می‌افتد. در واقع، حباب‌های بخار به دلیل اختلاف چگالی که با آب دارند، به طرف بالا حرکت کرده و از سطح خارج شده و وارد قسمت کاملاً بخار استوانه می‌شوند و سپس به مافوق گرم‌کن‌ها جریان می‌یابند. در اینجا فرض شده است که جدایش فازها به صورت کاملاً ثقلی و در زیر سطح آب استوانه اتفاق می‌افتد. در مولدهای بخار، معمولاً سطح استوانه را به صورت زیر تعریف می‌کنند [۲۷].

$$l = \frac{V_{sd}^* - V_{sd}}{A_d} \quad (۱۷-۳)$$

که در آن V_{sd} حجم لحظه‌ای بخار بالای سطح، V_{sd}^* حجم بخار بالای سطح در حالت تعادل نرمال و A_d سطح مرطوب استوانه در حجم V_{sd}^* می‌باشند. برای مدل سازی توزیع آب و بخار از [۲۸ و ۲۱] بهره می‌گیریم تا تمام پارامترهای تعریف کننده مدل توزیع بخار فیزیکی باشند. با موازنه جرم برای بخار بالای سطح خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt}[\rho_s V_{sd}] = \dot{m}_{sd} - \dot{m}_d \quad (۱۸-۳)$$

که در آن $\dot{m}_d$ دبی جرمی بخار خروجی از استوانه به سمت مافوق گرم‌کن‌ها و $\dot{m}_{sd}$ دبی جرمی بخار خارج شده از سطح مخلوط آب و بخار استوانه می‌باشند. این معادله مرتبه یک است. با توجه به معادله (۱۷-۳) می‌توان l را متغیر حالت پنجم در نظر گرفت. از طرف دیگر $\dot{m}_{sd}$ نیز این گونه تعریف می‌شود.

$$\dot{m}_{sd} = \rho_s V_{Drift} A_d \alpha_m \quad (۱۹-۳)$$

که در آن α_m جزء بخار مخلوط آب و بخار زیر سطح استوانه V_{Drift} سرعت درگ مربوط به فاز بخار می‌باشند. α_m به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_m = \frac{v_{ms}}{v_m} \quad (۲۰-۳)$$

که در آن v_{ms} حجم بخار موجود در زیر سطح استوانه و v_m نیز حجم مخلوط آب و بخار در زیر سطح استوانه می‌باشند. این دو پارامتر اخیر را با استفاده از داده‌های ساختمانی مولد بخار و متغیرهای حالتی که تاکنون تعریف کرده‌ایم، می‌توانیم بازنویسی نمائیم:

$$v_{ms} = v_t - v_{wt} - \bar{\alpha} v_r - v_{sd} \quad (۲۱-۳)$$

$$v_m = v_d - v_{sd} \quad (۲۲-۳)$$

که در معادلات (۲۳-۳)، v_d حجم استوانه می باشد. v_{Drift} نیز اینگونه تعریف می شود [۲۸].

$$v_{Drift} = \frac{1.41}{1 - \alpha_m} \left(\frac{\sigma g \rho_{ws}}{\rho_w^2} \right)^{1/4} \quad (23-3)$$

که در آن σ کشش سطحی بین آب و بخار می باشد. با جایگذاری معادلات (۱۹ تا ۲۳) در معادله (۱۸) خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} [\rho_s v_{sd}] = 1.41 \rho_s A_d \left(\frac{\sigma g \rho_{ws}}{\rho_w^2} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{1 - \frac{v_t - v_{wt} - \alpha v_r - v_{sd}}{v_d - v_{sd}}} - 1 \right) - \dot{m}_d \quad (24-3)$$

به این ترتیب معادله دینامیکی توزیع بخار در استوانه به دست می آید. شبیه سازی مدل های دینامیکی به مقادیر یا شرایط اولیه نیاز دارد. پس باید معادلات را برای حالت تعادل ساده کرد و متغیرهای حالت اولیه را با توجه به اطلاعات مربوط به نقطه کارکرد (تعادل)، محاسبه نمود.

۳-۲-۱-۶ زیرسیستم اول در حالت تعادل

معادلات موازنه کلی جرم و انرژی:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_d \quad (25-3)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_s h_s - \dot{m}_f h_f \quad (26-3)$$

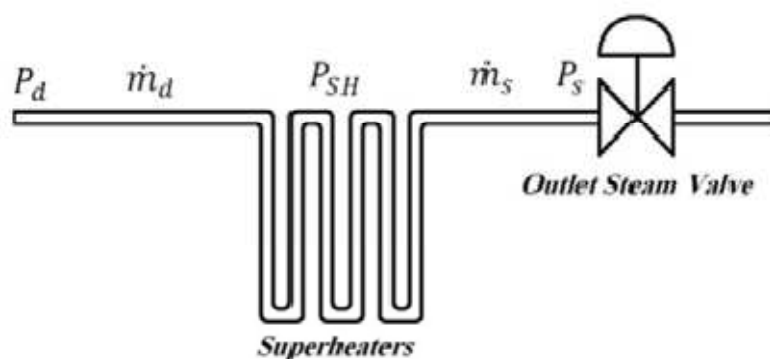
۳-۲-۱-۷ مدل سازی زیرسیستم دوم

علت بررسی دینامیک زیرسیستم دوم به قابلیت ذخیره بخار در آن و افت فشار بخار گذرنده از آن مربوط می شود. در واقع، هر چه دبی بخار خروجی زیاد می شود، این افت فشار زیادتر شده و برای

جبران آن لازم است استوانه در فشار بالاتری کار کند. رفتار غیرخطی مولد بخار در بارهای مختلف نیز عمدتاً به این دلیل است. با موازنه جرم در مافوق گرم‌کن‌ها، خواهیم داشت.

$$\frac{d}{dt}[\rho_{sH} v_{sH}] = \dot{m}_s - \dot{m}_d \quad (27-3)$$

که در آن $\dot{m}_s$ دبی جرمی بخار خروجی از شیر کنترل روی توربین v_{sH} حجم کل مافوق گرم‌کن‌ها و ρ_{sH} چگالی بخار موجود در مافوق گرم‌کن‌ها می‌باشند شکل (۳-۴).



شکل (۳-۴) مافوق گرم‌کن‌ها و شیر کنترل بخار خروجی

فرض می‌کنیم کنترلر دما در مافوق گرم‌کن‌ها به صورت اتوماتیک عمل می‌کند. پس فرایندی را که بخار در مافوق گرم‌کن‌ها طی می‌کند، از نظر دمایی پایدار در نظر می‌گیریم. بنابراین ρ_{sH} فقط وابسته به فشار بوده و دمای آن نیز میانگین دمای ورود (اشباع) و خروج از مافوق گرم‌کن‌ها (معمولاً ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) در نظر می‌گیریم. با توجه به مرتبه اول بودن معادله بالا، فشار مافوق گرم‌کن‌ها را به عنوان متغیر حالت ششم انتخاب می‌کنیم. برای سادگی فرض می‌کنیم بخش اول افت فشار تا مافوق گرم‌کن‌ها و بخش دوم آن بعد از مافوق گرم‌کن‌ها اتفاق می‌افتد. به این ترتیب فشار مافوق گرم‌کن‌ها نیز میانگین فشار ورود و خروج در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، با توجه معادلات مکانیک سیالات، خواهیم داشت.

$$p_d - p_{sH} = f_1 \dot{m}_d^2 \quad (28-3)$$

$$p_{sH} - p_s = f_2 \dot{m}_s^2 \quad (29-3)$$

که در این دو معادله f_1 و f_2 ضرایب ثابت مربوط به افت فشار در مافوق گرم‌کن‌ها و لوله‌های رابط، p_{sH} فشار میانگین بخار در مافوق گرم‌کن‌ها و p_s فشار بخار خروجی از مافوق گرم‌کن‌ها روی شیر کنترل می‌باشند. مسئله کنترل فشار در نیروگاه‌ها نیز به حفظ و کنترل p_s فشار پیرامون مقدار مطلوب آن^۱ مربوط می‌شود.

۳-۲-۱-۸ زیرسیستم دوم در حالت تعادل

معادلات حاکم بر زیر سیستم دوم به هنگام تعادل به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\dot{m}_s = \dot{m}_d \quad (30-3)$$

$$p_d - p_{sH} = f_1 \dot{m}_d^2 \quad (31-3)$$

$$p_{sH} - p_s = f_2 \dot{m}_s^2 \quad (32-3)$$

۳-۲-۱-۹ مدل سازی زیرسیستم های سوم و چهارم و پنجم

برای مدل سازی کوره، شیر کنترل بخار خروجی و شیر کنترل آب تغذیه از مدل درجه یک با تاخیر زمانی بهره گرفته شده است که به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$T(c) = \frac{ce^{-t_d s}}{\tau s + 1} \quad (33-3)$$

که در آن τ ثابت زمانی، t_d تاخیر زمانی و c عدد ثابت می‌باشند.

۳-۳ مشکلات کنترل مولد بخار

در این قسمت به بررسی و تحلیل مشکلات کنترلی مولد بخار بر اساس مدل در نظر گرفته شده خواهیم پرداخت. کنترل نامناسب سطح آب در مولدهای بخار باعث خاموش‌سازی کل نیروگاه می‌شود. مقدار سطح آب در مولدهای بخار باید در محدوده مقدار بیشینه و کمینه معینی تغییر کند، فرا

1 -Steam Pressure Set Point

رفتن سطح آب از مقدار بیشینه تعیین شده سبب می شود کیفیت بخار خروجی از نظر مقدار رطوبت مجاز موجود در آن کاهش یافته و سبب وارد آمدن آسیب جدی به پره های توربین و کاهش عمر کاری آن شود. پایین آمدن سطح آب از مقدار کمینه تعیین شده نیز سبب می شود انتقال حرارت از خنک کننده مدار اولیه به سیال مدار ثانویه کاهش یافته و دمای راکتور از حد مجاز کاهش یافته که این امر ایمنی راکتور هسته ای را به مخاطره می اندازد. این محدودیت ها باعث ایجاد مشکلات اساسی در طراحی یک کنترل کننده مطلوب برای یک مولد بخار می شوند [۵].

به طور کلی مشکلات ناشی از کنترل صحیح سطح آب در مولدهای بخار را می توان در موارد زیر جستجو کرد:

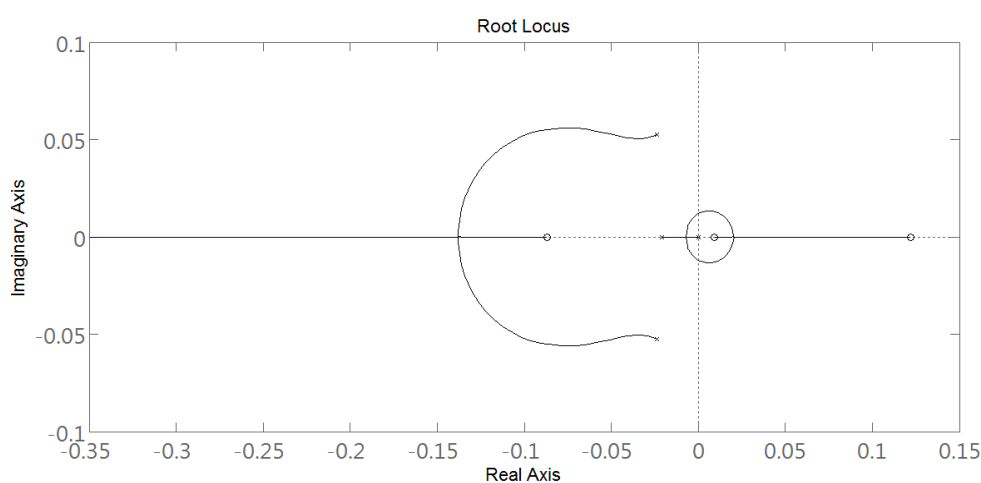
- ۱- ناپایدار بودن سیستم حلقه باز بدلیل وجود جریان های دو فاز
- ۲- دینامیک معکوس یا اثر غیر مینیمم فاز
- ۳- تغییر در مقدار پارامترهای مولد بخار و تغییر آنها با زمان مانده هر پروسه صنعتی دیگر.
- ۴- ماهیت غیرخطی مولد بخار که این امر با وابستگی شدید پارامترهای مدل ارائه شده به نقطه کار مولد بخار نمود عینی پیدا می کند.
- ۵- وجود محدودیت در مقدار دبی آب تغذیه ورودی تحویلی به مولد بخار .

۱-۳-۳ ناپایدار بودن سیستم حلقه باز

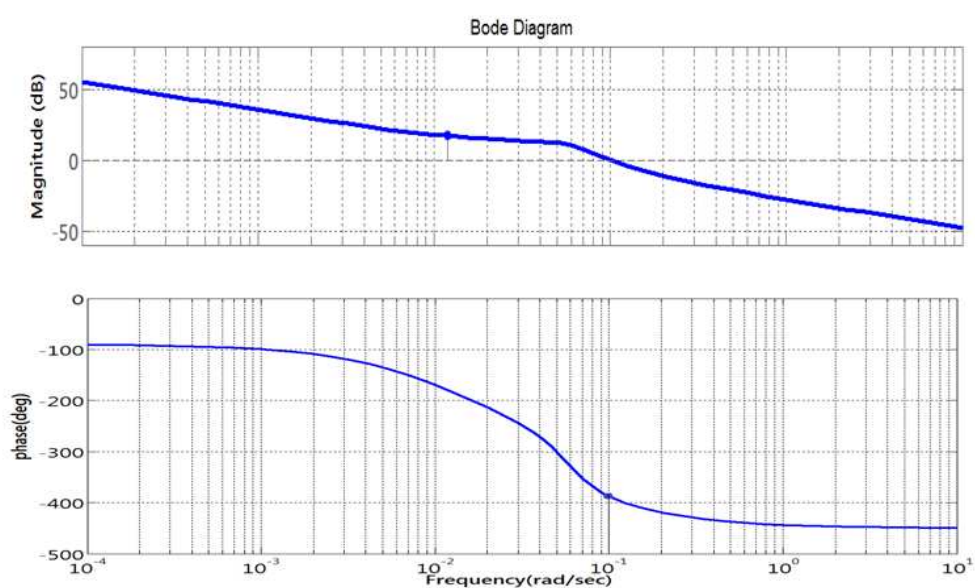
در شکل (۳-۵) نمودار مکان هندسی ریشه ها برای تابع تبدیل سطح آب نسبت به دبی آب تغذیه ورودی در ۵ درصد قدرت اسمی نشان داده شده است. رسم این نمودار برای نشان دادن ناپایدار بودن سیستم کافی بنظر می رسد. چرا که برای کنترل سطح آب در مولد بخار دبی بخار خروجی از طریق یک حلقه پیش خور به دبی آب تغذیه ورودی اضافه می شود. برای رسم این نمودارها، ابتدا ورودی فلو بخار خروجی در رابطه (۳-۱) را صفر می کنیم، سپس تابع تبدیل سیستم را بر حسب ورودی آب تغذیه بدست می آوریم. تابع تبدیل بدست آمده به صورت رابطه (۳-۳۴) است.

$$TF = \frac{y(s)}{q_e(s)} = \frac{193s^3 - .08s^2 - .01s + .001}{4.84s^4 + 3.31s^3 + .2s^2 + .003s} \quad (3-34)$$

همانطور که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است، سیستم حلقه بسته دارای چهار قطب و سه صفر می‌باشد. قطب در مبدأ ناپایداری سیستم حلقه باز، و دو صفر سمت راست غیرمینیمم فاز بودن آنرا نشان می‌دهند. بررسی نمودار بود نیز بیان می‌کند که سیستم دارای حاشیه بهره ۱۷db- و حاشیه فاز ۲۰۸(deg)- است، و این ناپایدار بودن سیستم حلقه باز را بیان می‌کند.



شکل (۳-۵) مکان هندسی ریشه ها برای تابع تبدیل سطح آب نسبت به دبی آب تغذیه ورودی



شکل (۳-۶) دیاگرام بودی تابع تبدیل سطح آب نسبت به دبی آب تغذیه ورودی

۲-۳-۳ بررسی پدیده‌های انبساط و انقباض در مولد های بخار

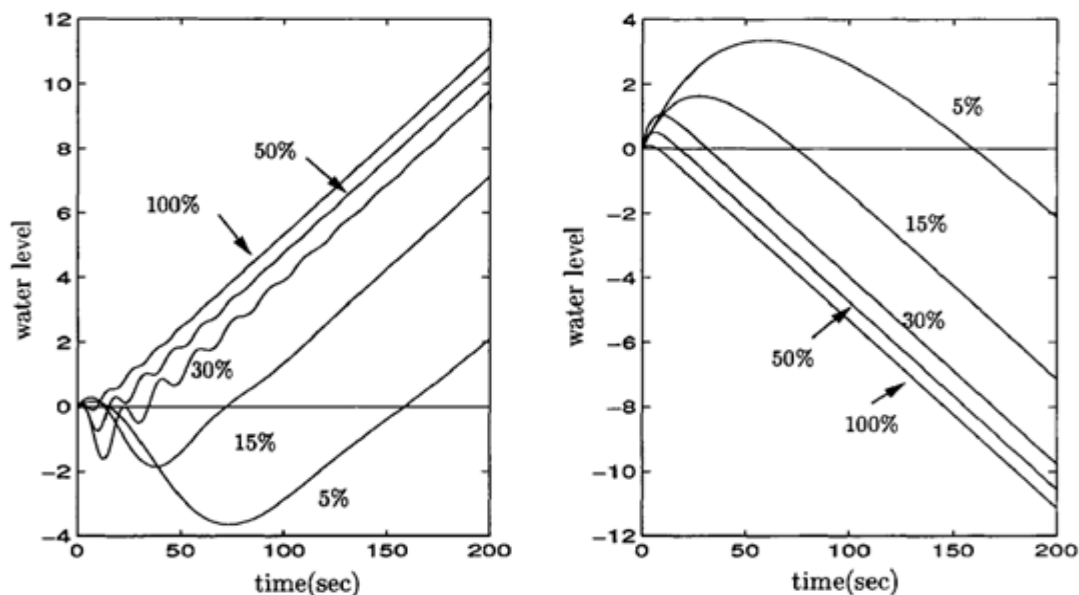
یکی از مشکلات موجود در کنترل سطح آب مولدهای بخار از پدیده‌های ترموهیدرولیکی انبساط و انقباض ناشی می‌شود. برای درک بهتر این دو پدیده باید عملکرد مولد بخار را در طی تغییر بار توربینی که بخار خروجی از مولد بخار آن را به گردش در می‌آورد، بررسی کرد.

اگر بار توربین کاهش یابد دبی بخار خروجی نیز کاهش پیدا می‌کند. کاهش دبی بخار خروجی باعث افزایش فشار در قسمت بالای سطح آب درون مولد بخار می‌شود. در این شرایط نرخ تولید بخار بیشتر از نرخ مصرف آن است. در این حالت با توجه به این که مقدار آب موجود ناشی از اختلاف آب تغذیه ورودی و بخار خروجی است انتظار می‌رود سطح آب در مولد بخار افزایش یابد حال آنکه در عمل و به دلیل پدیده انقباض عکس این حالت اتفاق می‌افتد. وقتی فشار درون مولد بخار افزایش می‌یابد بدلیل وجود جریان دو فاز مایع - بخار و وجود حباب های بخار در زیر سطح آب این حباب‌ها کاهش حجم یافته و منجر به کاهش سطح آب مولد بخار می‌شوند. البته این رفتار یک رفتار گذرا بوده و پس از طی مدت زمان معینی که تابع دینامیک سیستم (محل قرار گرفتن صفر ناپایدار سیستم در صفحه مختلط) است، از بین می‌رود. پدیده انقباض را در هنگام افزایش دبی آب تغذیه ورودی نیز می‌توان مشاهده کرد. در این حالت نیز بر خلاف انتظار سطح آب کاهش می‌یابد. وقتی دبی آب تغذیه ورودی سرد به مولد بخار افزایش می‌یابد حجم حباب‌ها در زیر سطح آب کاهش یافته و منجر به پایین آمدن سطح آب می‌شود حال آنکه طبق انتظار باید سطح آب افزایش می‌یافت.

پدیده انبساط نیز تحلیلی مشابه پدیده انقباض دارد. وقتی بار توربین و به تبع آن دبی بخار خروجی مولد بخار افزایش یابد فشار درون مولد بخار کاهش یافته و افزایش حجم حباب های بخار زیر سطح آب باعث بالا رفتن سطح آب برای مدت زمان معینی می‌شوند. به همین ترتیب اگر دبی آب تغذیه ورودی مولد بخار کاهش یابد از آنجا که آب سرد وارد شده به ناحیه دو فاز کاهش می‌یابد حجم حباب

های این ناحیه افزایش یافته و در نتیجه سطح آب افزایش می‌یابد. پدیده ترموهیدرولیکی انقباض باعث تاثیرات معکوس می‌شوند.

صفر ناپایدار تابع تبدیل مولد بخار که سیستم را غیرمینیمم فاز می‌کند. برای مدل کردن این دو پدیده بکار می‌رود لازم به ذکر است که این دو پدیده در قدرت‌های پایین کاری مولد بخار (قدرت های کمتر از ۲۰ درصد قدرت اسمی) بیشتر نمود داشته و دقیقا به همین خاطر است که طراحی کنترل کننده در قدرت‌های پایین مشکل تر است. در شکل (۷-۳) پاسخ پله مولد بخار به دبی آب تغذیه ورودی و دبی بخار خروجی نشان داده شده است.



شکل (۷-۳) پاسخ مولد بخار به دبی آب تغذیه ورودی (چپ) و دبی بخار خروجی (راست) [۵]

۴-۳ کنترل کننده‌های کلاسیک PID

کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی با کنترل کننده‌های سه جمله‌ای دارای مقبولیت فراوانی هستند و گستره وسیعی از کارهای کنترلی در صنعت توسط آنها انجام می‌شود. این کنترل کننده‌ها

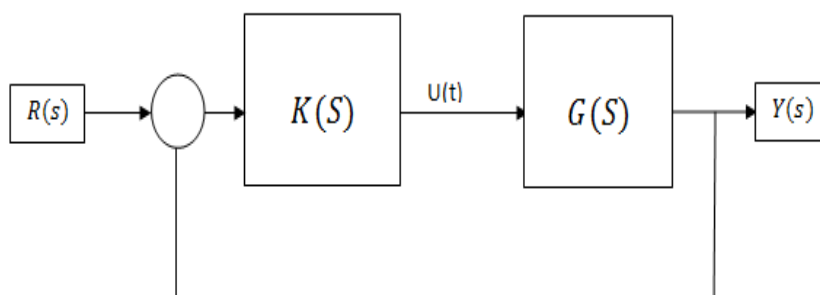
دارای کارایی بسیار بالایی در مسائل عملی کنترل بوده و از این رو به عنوان یکی از موارد اساسی و اولیه هر مهندسی کنترل به شمار می‌روند [۳۴].

اگر کنترل‌کننده از نوع PID باشد تابع تبدیل $k(s)$ به صورت زیر خواهد بود.

$$k(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (۳-۳۴)$$

جمله k_p جمله تناسبی بوده و سیگنالی متناسب با خطای موجود بین خروجی مطلوب و خروجی سیستم کنترل شونده اعمال می‌کند. با نزدیک شدن خروجی سیستم به خروجی مطلوب اثر خطا کاهش یافته و به صفر می‌رسد. جمله دوم شامل k_i از سیگنال خطا در طول زمان انتگرال گرفته و باعث از بین رفتن خطای ماندگار سیستم می‌شود. جمله سوم شامل k_d نیز سیگنالی متناسب با تغییرات خطای سیستم به وجود آورده و معمولاً سرعت پاسخ را افزایش می‌دهد. در فاز طراحی پارامترهای کنترل‌کننده باید به نحوی تعیین و تنظیم شوند که سیستم پاسخ مطلوب و مورد انتظار را از خود نشان دهد. روش‌های مختلف و زیادی برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده سه جمله‌ای ارائه شده است [۳۴].

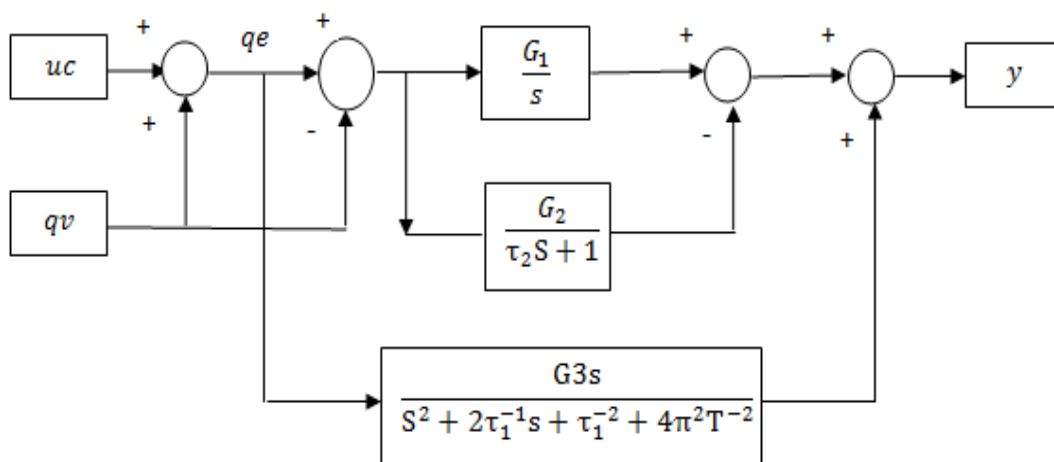
شکل (۳-۸) ساختار یک سیستم حلقه بسته را نشان می‌دهد که در آن کنترلر با تابع $k(s)$ سیگنال $u(t)$ را به سیستم تحت کنترل با تابع تبدیل $G(s)$ اعمال می‌کند. در این شکل $r(t)$ سیگنال مرجع و $y(t)$ خروجی سیستم تحت کنترل است.



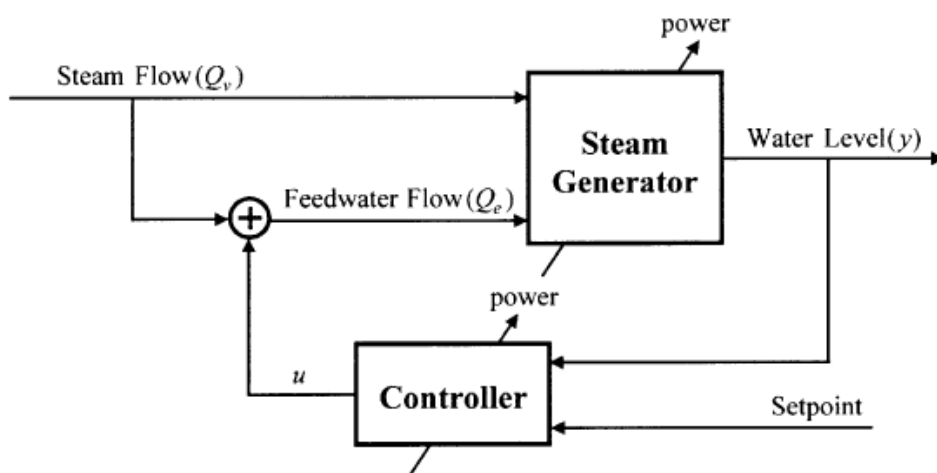
شکل (۳-۸) ساختار یک سیستم حلقه بسته

۳-۴-۱ طراحی کنترل کننده کلاسیک PI برای مولد بخار

در این قسمت، به طراحی کنترل کننده های تناسبی- انتگرالی خواهیم پرداخت. از آنجا که مدل مولد بخار توسط رابطه (۳-۱) معین می شود، باید طراحی کنترل کننده در قدرت های کاری مختلف انجام شود. بلوک دیاگرام مولد بخار در شکل (۳-۹) نشان داده شده است:



شکل (۳-۹) بلوک دیاگرام مولد بخار



شکل (۳-۱۰) ساختار حلقه کنترلی برای مولد بخار

شکل (۳-۱۰) نیز ساختار کنترلی بکار رفته را نشان می‌دهد. در این ساختار از یک حلقه پیش‌خور برای اضافه کردن مقدار دبی بخار خروجی به خروجی کنترل‌کننده استفاده شده است. همانطور که در شکل مشخص است این ساختار باعث می‌شود مسأله طراحی کنترل‌کننده برای مولد بخار، به یک مسأله تک ورودی - تک خروجی تبدیل شود. در مرجع [۳۵]، اشاره شده است که میزان تأثیر جمله سوم رابطه (۳-۱) که نشان دهنده نوسانات مکانیکی است، ناچیز بوده و با دقت خوبی می‌توان از تأثیر دادن آن در فرآیند طراحی کنترل‌کننده صرف‌نظر کرد.

۳-۴-۲ طراحی کنترل‌کننده برای قدرت های بالاتر

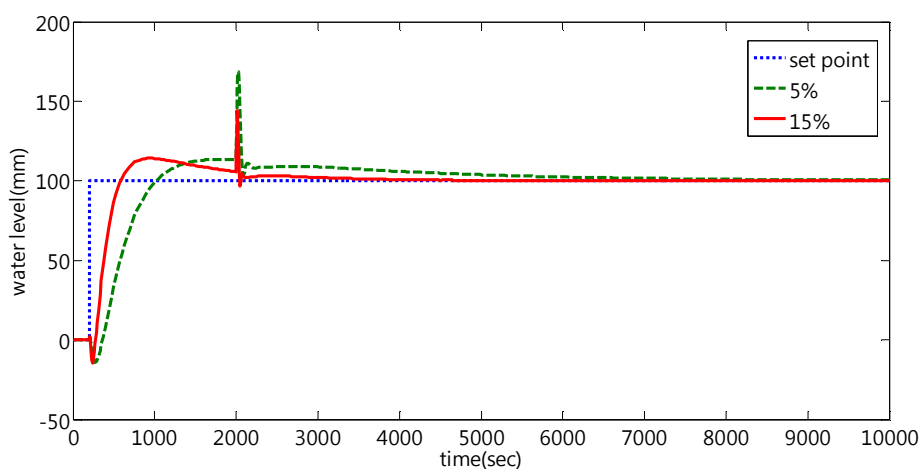
مقدار ضرایب جملات تناسبی انتگرالی کنترل‌کننده طراحی شده PI، برای مولد بخار در سطوح قدرت مختلف در جدول (۳-۲) نشان داده شده است:

جدول (۳-۲) مقدار ضرایب جملات تناسبی انتگرالی کنترل‌کننده PI، در سطوح قدرت مختلف [۳۳]

P/%	5	15	30	50	100
k_P	0.036	0.076	0.157	0.293	0.899
k_I	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$6.2 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	0.001	0.005

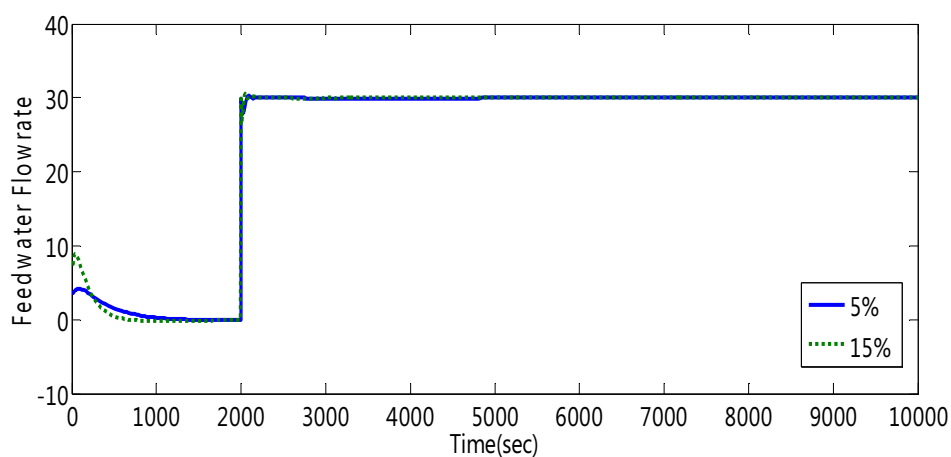
عملکرد کنترل‌کننده بر اغتشاش‌های اعمالی خارجی، اغتشاشی معادل ۵ درصد دبی بخار اسمی قدرت پنجاه درصد، به اندازه، $30 \left(\frac{kg}{s}\right)$ در لحظه ۲۰۰۰ ثانیه، به سیستم اعمال شده است. در شکل (۳-۱۱) پاسخ پله^۱ کنترل‌کننده PI طراحی شده در قدرت های ۵ و ۱۵ درصد همراه اغتشاش مورد نظر نشان داده شده است. همانطور که نشان داده شده است، با توجه به زمان طولانی پاسخ سیستم، کنترل‌کننده PI در این سطوح قدرت عملکرد مناسبی ندارد.

¹ - Step Response



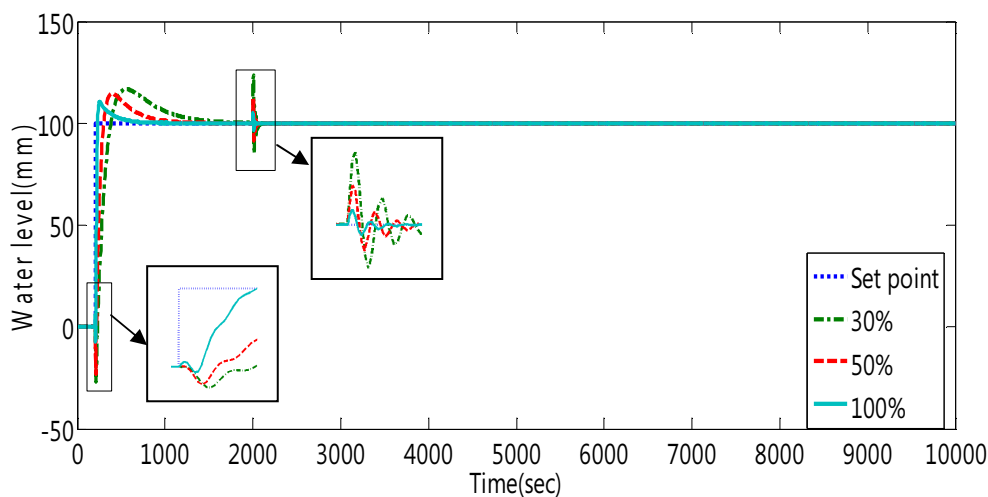
شکل (۱۱-۳) پاسخ پله کنترل کننده PI طراحی شده در قدرت های ۵ و ۱۵ درصد

در شکل (۱۲-۳) سیگنال آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار سطح قدرت ۵ و ۱۵ درصد، نشان داده شده است. در سطوح قدرت، سیگنال آب تغذیه اعمال شده دارای نرخ تغییرات کمتری نسبت به قدرت های ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد کنترل کننده است.



شکل (۱۲-۳) آب تغذیه اعمالی به مولد بخار در سطح قدرت ۵ و ۱۵ درصد

در شکل (۳-۱۳) پاسخ پله کنترل کننده طراحی شده در قدرت های ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد همراه اغتشاش فلو بخار آمده است. اغتشاش در نظر گرفته شده در لحظه ۲۰۰۰ ثانیه به سیستم اعمال شده است. این نمودار نشان می دهد در قدرت های بیشتر از ۳۰ درصد، با افزایش قدرت عملکرد کنترل کننده بطور محسوسی بهتر شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است با افزایش قدرت پدیده انقباض و انقباض کاهش می یابد، بنابراین پاسخ گذرای سیستم بهتر شده، و میزان فراجش^۱ و فروجهش^۲ پاسخ پله نسبت به قدرت های ۳۰ و ۵۰ درصد، کمتر است. در فصل بعد نشان خواهیم داد که کنترل کننده فازی برای مولد بخار پاسخ گذرای بهتری نسبت کنترل کننده های کلاسیک دارد.



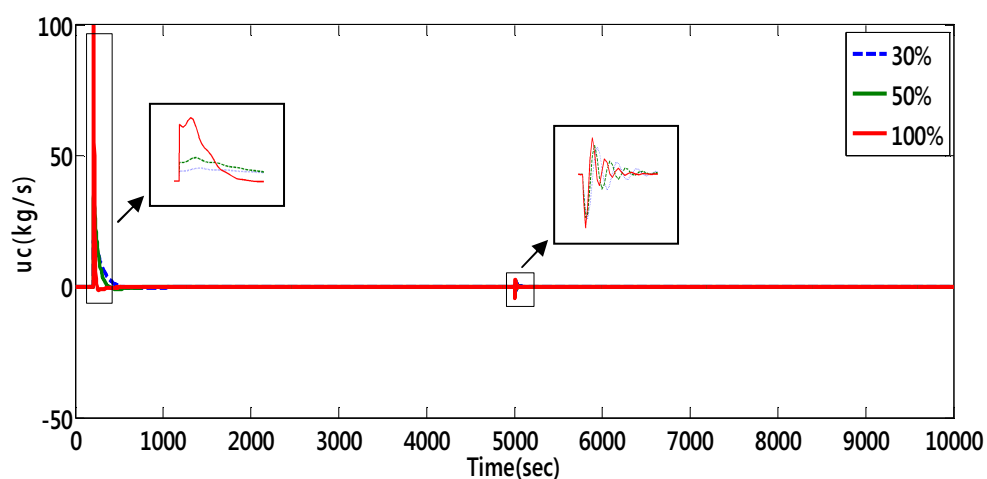
شکل (۳-۱۳) پاسخ پله کنترل کننده PI طراحی شده در قدرت های ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد

در شکل (۳-۱۴) سیگنال کنترلی^۳، کنترل کننده کلاسیک PI در قدرت های ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد همراه اغتشاش فلو بخار نشان داده شده است. در اینجا اغتشاش در زمان ۵۰۰۰ ثانیه به سیستم اعمال شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است سیگنال کنترلی در زمان کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه به صفر رسیده است. اما با افزایش قدرت، میزان تغییرات آن بیشتر است.

^۱ - Overshoot

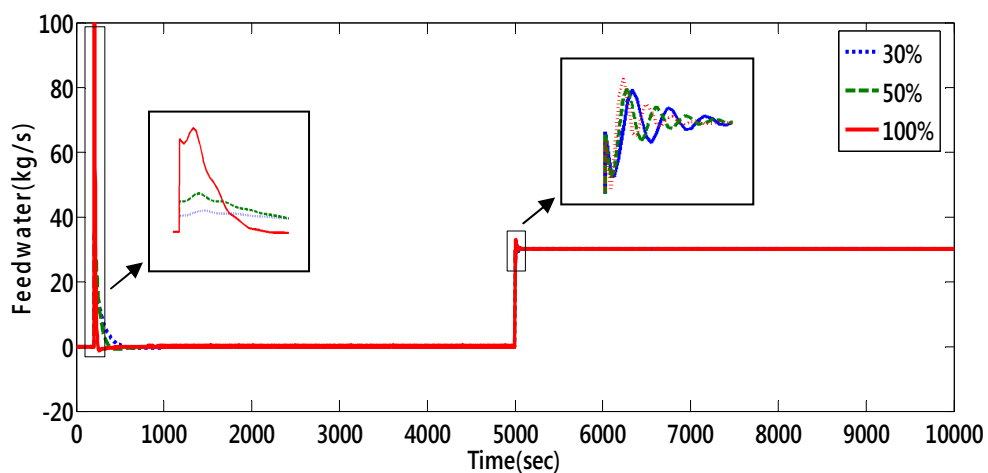
^۲ - undershoot

^۳ - Signal Control

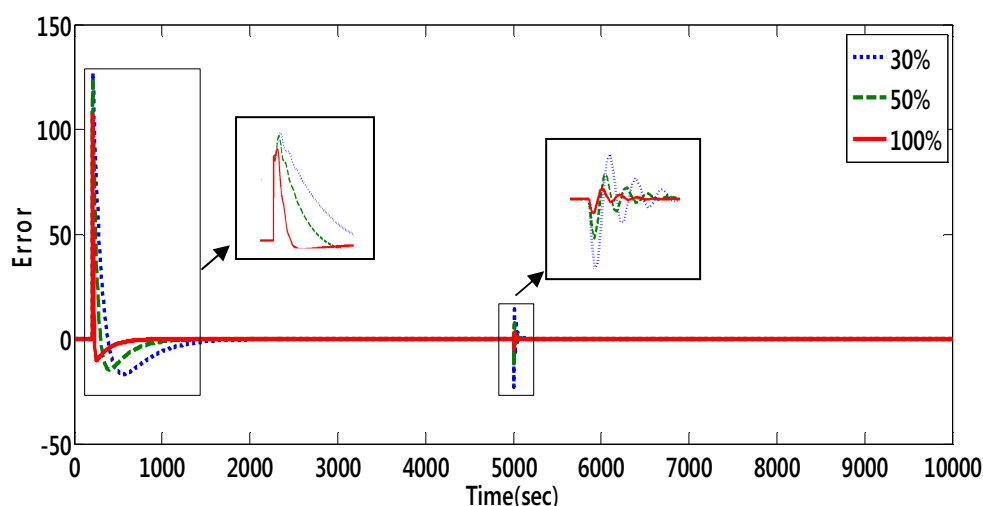


شکل (۳-۱۴) سیگنال کنترلی کنترل کننده کلاسیک PI در قدرت های ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد

سیگنال آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار سطح قدرت های ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد، در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده است. در این سطوح قدرت، سیگنال آب تغذیه اعمال شده دارای نرخ تغییرات بیشتری نسبت به قدرت های پایین است.



شکل (۳-۱۵) آب تغذیه اعمالی به مولد بخار در سطح قدرت ۳۰ و ۵۰ و ۱۰۰ درصد



شکل (۳-۱۶) سیگنال خطا

سیگنال خطا بین Set point (ورودی^۱) و خروجی^۲ مولد بخار، همراه اغتشاش اعمال شده در زمان ۵۰۰۰ ثانیه در شکل (۳-۱۶) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، با افزایش قدرت تغییرات سیگنال خطا کمتر است.

مقادیر نشان داده شده در جدول (۳-۲) نشان دهنده مشکل استفاده شده از کنترل کننده در مولد های بخار به خصوص در سطوح قدرت پایین می باشد. جمله انتگرال گیر عملاً نقش بسیار کوچکی در فرآیند کنترل مولد بخار ایفا می کند. از طرف دیگر، بهره تناسبی کنترل کننده در قدرت های بسیار پایین، کاهش قابل ملاحظه ای داشته و عملکرد کنترل کننده را تحت تأثیر قرار می دهد. بنابراین بنا بر دلایل گفته شده، مولدهای بخار در عمل و در قدرت های کاری بالاتر از ۲۰ تا ۳۰ درصد، توسط روش های کلاسیک کنترل شده و در قدرت های پایین تر، از اپراتورهای آموزش دیده برای این کار استفاده می شود.

^۱ - Input

^۲ - Output

۳-۵ ارتباط سیستم کنترل سطح آب در مولد های بخار و تنظیم قدرت در نیروگاه

بطور کلی یکی از انتظارات شبکه مصرف از نیروگاه را می توان تأمین توان لحظه ای مورد نیاز شبکه دانست. برای هر شبکه مصرف، منحنی هایی که بر اساس اطلاعات آماری بدست آمده از نحوه رفتار مصرف کننده بدست آمده و به منحنی های تداوم بار^۱ معروف هستند، وجود دارند. بر این اساس، بار پایه ای برای شبکه بدست آمده، وظیفه تأمین این بار پایه بین نیروگاه های مختلف تقسیم می شود. بر اساس نیازهای شبکه، نیروگاه باید بتواند سطح قدرت خود را تغییر داده^۲ و یا آنرا تنظیم کند، تغییر سطح قدرت در نیروگاه ها از طریق تغییر سطح قدرت توربین و توسط تغییر مقدار دبی بخار وارد شده به آن انجام می شود (قدرت توربین متناسب با دبی بخار ورودی و اختلاف آنتالپی دو سر آن می باشد). برای تنظیم قدرت در نیروگاه ها نیز از تغییر آنتالپی بخار ورودی استفاده می شود که ساده ترین راه تغییر آن تغییر فشار بخار ورودی است. در حالت کلی، سه استراتژی کنترلی برای تنظیم قدرت در نیروگاه های بخار که نیروگاه های هسته ای نیز در این رده قرار دارد، در نظر گرفته می شود.

روش کنترلی فشار ثابت^۳: در این روش، فشار بخار تولید شده توسط مولد بخار ثابت بوده و تغییرات فشار بخار ورودی به توربین به وسیله عمل خفه کردن بخار توسط شیر خفه کننده انجام می شود. مزیت اصلی این روش سرعت بالای بارپذیری بوده و تلفات زیاد بخار از عیب های اصلی آن محسوب می شود.

روش کنترلی فشار متغیر^۴: در این روش، فشار مورد نیاز توربین به مولد بخار اعمال شده و مولد بخار باید بخار مورد نیاز توربین را تأمین کند. در این روش تلفات بخار به طور محسوسی کاهش یافته و در عوض پاسخ سیستم کندتر می شود.

^۱ - Load Duration curve

^۲ - Power level change

^۳ Constant pressure

^۴ Changing pressure

روش کنترلی فشار ترکیبی^۱: در این روش از ترکیب روش های اول و دوم استفاده می شود. برای دستیابی به هر یک از روش های کنترلی ذکر شده در بالا و در نیروگاه های هسته ای، راکتور باید بتواند پارامترهای خود را طوری تغییر دهد تا سیستم کلی بتواند در حالت کاری مورد نظر قرار گیرد. این عمل معمولاً بوسیله تغییر دمای متوسط مدار اولیه انجام می شود، به این ترتیب که مقدار دمای متوسط مدار اولیه مورد نیاز برای دستیابی به حالت های کنترلی فشار ثابت یا فشار متغیر در تمام سطوح قدرت بدست آمده و با جابه جایی مناسب میله های کنترل سعی می شود تا دمای متوسط مدار اولیه از الگوی بدست آمده تبعیت کند. [۱۰]

۳-۶ نتیجه گیری

در این فصل، پس از معرفی مشکلات کنترلی مولدهای بخار و توضیح آنها، با مدلی از مولد بخار که برای طراحی کنترل کننده، بکار می رود، آشنا شده و پارامترهای آنرا تحلیل کردیم. کنترل کننده کلاسیک را بررسی کردیم. در ادامه، به طراحی کنترل کننده های کلاسیک برای مولد بخار پرداخته و به موانع ناشی از دینامیک حاکم بر سیستم در طراحی کنترل کننده، اشاره کردیم. به علت افزایش اثر ناشی از فرایندهای ترموهیدرلیکی انبساط و انقباض، کارکرد کنترل کننده در قدرت های پایین کاری مولد بخار بشدت کاهش می یابد. در فصول بعدی، به معرفی کنترل کننده های فازی پرداخته و از آنها برای کنترل مولد بخار استفاده خواهیم کرد.

¹ Compound pressure

فصل چهارم

طراحی کنترل کننده فازی برای مولد بخار

در سالیان اخیر، به دلیل امر خصوصی سازی در اکثر کشورهای جهان تغییرات چشمگیری در صنعت تولید برق به وقوع پیوسته است، در حقیقت تغییر بار سریع نیروگاه‌ها برای تولید توان رو به افزایش بوده و مجهز کردن نیروگاه‌ها به سیستم کنترل قدرتمندتر و دقیق‌تر به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. پس در طراحی سیستم‌های کنترل، باید به طور عملی‌تر عمل کرده و مدل ساده تجهیزات را با مدل‌های واقعی‌تر و دقیق‌تر جایگزین نمود [۳۲]. از اهداف اصلی در طراحی کنترل‌کننده بدست آوردن یک کنترل‌کننده مقاوم و پایدار است. دینامیک‌های مولد بخار شامل ورودی آب تغذیه، اغتشاش فلو بخار و خروجی سطح آب است. افزایش و کاهش فلو بخار خروجی سبب ایجاد پدیده انبساط و انقباض می‌شود. با افزایش قدرت مولد بخار، از میزان اثرات پدیده انبساط و انقباض کمتر می‌شود و سرعت پاسخ سیستم افزایش می‌یابد. در فصل قبل به کنترل مولد بخار با استفاده از کنترل‌کننده‌های کلاسیک پرداختیم. همانطور که دیدیم برای کنترل سطح آب، به دلیل پیچیدگی‌های دینامیکی و رفتار غیرخطی مولد بخار مخصوصاً در قدرت‌های کمتر از ۳۰ درصد از افراد آموزش دیده استفاده می‌شود. بنابراین این امر ایده استفاده از سایر روش‌های کنترلی را در ذهن تداعی می‌کند. در این فصل به طراحی کنترل‌کننده فازی برای آنها پرداخته و عملکرد آنها را در سطوح مختلف قدرت بررسی خواهیم کرد. همچنین به چگونگی شبیه‌سازی این نوع کنترل‌کننده در محیط شبیه ساز^۱ اشاره خواهیم کرد. عملکرد سیستم کنترل شده را از نقطه نظر مواجه با اعمال اغتشاش^۲ به سیستم تحت کنترل را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

^۱ Simulator

^۲ Disturbance

۴-۲ نگاهی به سیستم های فازی

پس از معرفی تئوری منطق فازی توسط پروفیسور زاده در سال ۱۹۶۵ [۳۶ و ۳۷]، سیستم های فازی تا کنون رشد چشمگیری داشته و یکی از پایه های اساسی هوش محاسباتی به شمار می آید. همچنین تحقیقات وسیعی بر روی کاربردهای این شیوه جدید آغاز شد که یکی از موارد استفاده های متعدد آن، سیستم های کنترل فازی است. واژه فازی^۱ در فرهنگ لغت آکسفورد به صورت "مبهم، گنگ، نادقیق، مغشوش، درهم و نامشخص" تعریف شده است. در این تحقیقات از همان واژه فازی استفاده می کنیم. سیستم های فازی، سیستم هایی هستند با تعریف دقیق و کنترل فازی نوع خاصی از کنترل غیرخطی می باشد که آن هم دقیقاً تعریف می شود. این مطلب مشابه کنترل سیستم های خطی می باشد که واژه خطی یک واژه فنی بوده که حالت و وضعیت سیستم و کنترل را مشخص می کند. چنین چیزی نیز در مورد واژه فازی وجود دارد. اساساً گرچه سیستم های فازی پدیده های غیرقطعی و نامشخص را توصیف می کنند، با این حال خود تئوری فازی یک تئوری دقیق می باشد. در این تحقیقات دو نوع توجیه برای سیستم های فازی یافته ایم:

۱- دنیای واقعی بسیار پیچیده تر از آن است که بتوان یک توصیف و تعریف دقیق برای آن بدست آورد، بنابراین باید یک توصیف تقریبی یا فازی که قابل قبول و قابل تجزیه و تحلیل باشد، برای یک مدل معرفی شود.

۲- با حرکت به سوی اطلاعات، دانش و معرفت بشری بسیار اهمیت پیدا می کند. بنابراین، به فرضیه ای نیاز داریم که بتواند دانش بشری را به شکلی سیستماتیک فرموله کرده و آنرا به همراه سایر مدل های ریاضی در سیستم های مهندسی قرار دهد.

توجیه اول گرچه درست است، با این حال طبیعت واحدی را برای تئوری سیستم های فازی مشخص نمی کند. در حقیقت تمامی نظریه های علوم مهندسی، دنیای واقعی را به شکل تقریبی، توصیف می

کنند. بعنوان مثال در عالم واقع تمامی سیستم‌ها به صورت غیرخطی می‌باشند ولی تقریباً تمامی مطالعات و بررسی‌ها بر روی سیستم‌های خطی می‌باشند. یک تئوری مهندسی خوب از یک سو باید بتواند مشخصه‌های اصلی و کلیدی دنیای واقعی را توصیف کرده و از سویی دیگر قابل تجزیه و تحلیل ریاضی باشد. بنابراین از این جنبه، تئوری فازی تفاوتی با سایر تئوری‌های علوم مهندسی ندارد.

توجیه دوم مشخصه واحدی از سیستم‌های فازی را توصیف کرده و وجود تئوری سیستم‌های فازی را به عنوان یک شاخه مستقل در علوم مهندسی توجیه می‌کند. بعنوان قاعده کلی، یک تئوری مهندسی خوب باید قادر باشد از تمامی اطلاعات موجود به نحو موثری استفاده کند.

در سیستم‌های عملی اطلاعات مهم از دو منبع سرچشمه می‌گیرند. یکی از منابع افراد خبره می‌باشند که دانش و آگاهی آنها را در مورد سیستم با زبان طبیعی تعریف می‌کنند. منبع دیگر اندازه‌گیری‌ها و مدل ریاضی هستند که از قواعد فیزیکی مشتق شده‌اند. بنابراین یک مسئله مهم ترکیب این دو نوع اطلاعات در طراحی سیستم‌ها است. سؤال کلیدی برای انجام این ترکیب این است که چگونه می‌توان دانش بشری را در چهار چوبی مشابه مدل‌های ریاضی فرموله کرد. اساساً آنچه که یک سیستم فازی انجام می‌دهد همین تبدیل است. برای اینکه بدانیم این تبدیل چگونه صورت می‌گیرد، ابتدا باید بدانیم سیستم‌های فازی، چگونه سیستم‌هایی هستند.

۳-۴ ساختار سیستم‌های فازی

سیستم‌های فازی، سیستم‌های مبتنی بر دانش یا قواعد^۱ می‌باشد. قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر- آنگاه فازی تشکیل شده است. یک قاعده اگر - آنگاه فازی یک عبارت اگر - آنگاه بوده که بعضی کلمات آن بوسیله توابع تعلق پیوسته مشخص شده‌اند. بطور خلاصه، نقطه شروع ساخت یک سیستم فازی بدست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر آنگاه فازی از دانش افراد خبره

1 - Knowledge – based or rule – based systems

یا دانش حوزه مورد بررسی می‌باشد. مرحله بعدی ترکیب این قواعد در یک سیستم واحد است. سیستم‌های فازی مختلف از اصول و روش‌های متفاوتی برای ترکیب این قواعد استفاده می‌کنند. بنابراین سؤال اساسی این است، چه نوع سیستم‌های فازی معمولاً استفاده می‌شود؟ در کتب و مقالات معمولاً از سه نوع سیستم فازی صحبت به میان می‌آید: (۱) سیستم فازی خالص، (۲) سیستم‌های فازی تاکاگی سوگنو و کانگ^۱ (TSK) و (۳) سیستم‌های فازی با فازی ساز^۲ و غیرفازی ساز^۳. مشکل اصلی در رابطه با سیستم‌های فازی خالص این است که ورودی‌ها و خروجی‌های آن مجموعه‌های فازی می‌باشند (واژه‌هایی در زبان طبیعی). در حالی که در سیستم‌های مهندسی، ورودی‌ها و خروجی‌ها متغیرهایی با مقادیر حقیقی می‌باشند. برای حل این مشکل، تاکاگی سوگنو و کانگ نوع دیگری سیستم‌های فازی معرفی کرده‌اند که ورودی‌ها و خروجی‌های آن متغیرهایی با مقادیر واقعی هستند. مشکلات عمده سیستم‌های فازی TSK عبارتند از: (۱) قواعد آنگاه یک فرمول ریاضی بوده و بنابراین چهار چوبی را برای نمایش دانش بشری فراهم نمی‌کند. (۲) این سیستم دست ما را برای اعمال اصول مختلف منطق فازی باز نمی‌گذارد و در نتیجه انعطاف‌پذیری سیستم‌های فازی در این ساختار وجود ندارد، برای حل این مشکلات از نوع سوم از سیستم‌های فازی یعنی سیستم‌های فازی با فازی سازها و غیرفازی سازها استفاده شده است.

به منظور استفاده از سیستم‌های فازی خالص در سیستم‌های مهندسی، یک روش ساده اضافه کردن یک فازی ساز در ورودی که متغیرهای با مقادیر حقیقی را به یک مجموعه فازی تبدیل کرده و یک غیرفازی ساز که مجموعه فازی را به یک متغیر با مقدار حقیقی در خروجی تبدیل می‌کند، می‌باشد. نتیجه یک سیستم فازی با فازی ساز و غیرفازی ساز است، که در بخش‌های بعدی به تشریح هریک از این بخش‌ها می‌پردازیم. این سیستم فازی معایب سیستم فازی خالص و سیستم فازی TSK را می‌پوشاند. [۳۸].

1- Takagi – Sugeno - Kang
 2 -Fuzzifier
 3 -DeFuzzifier

۱-۳-۴ سیستم های فازی تاکاگی سوگنو و کانگ (TSK)

سیستم های سوگنو توسط تاکاگی، سوگنو، کانگ نوشته شده است، شکل یک نمونه از قوانین سوگنو به صورت رابطه (۱-۴) می باشد.

$$\text{If } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = f(x,y) \quad (1-4)$$

معمولاً $f(x,y)$ یک چند جمله ای بر حسب متغیرهای ورودی x و y می باشد، هنگامی که $f(x,y)$ یک چند جمله ای مرتبه اول باشد، سیستم فازی از نوع first-order sogeno است. و هرگاه $f(x,y)$ یک عدد ثابت باشد، سیستم فازی از نوع zero-order sogeno داریم، که عملکرد آنها همانند سیستم های فازی از نوع ممدانی می باشد. در پروژه با توجه به عملکرد بهتر سیستم های فازی first-order sogeno از این نوع سیستم فازی استفاده شده است.

۲-۳-۴ سیستم های فازی با فازی ساز و غیرفازی ساز

۱-۲-۳-۴ پایگاه قواعد فازی

یک پایگاه قواعد فازی^۱ از مجموعه ای از قواعد اگر - آنگاه فازی تشکیل می شود. پایگاه قواعد فازی از این نظر که سایر اجزاء سیستم فازی برای پیاده سازی این قواعد به شکل موثر و کارا استفاده می - شوند، قلب یک سیستم فازی محسوب می شود. بطور مشخص، پایگاه قواعد فازی شامل قواعد اگر آنگاه فازی زیر است:

$$Ru^1 : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^1 \text{ and } \dots x_n \text{ is } A_n^1 \text{ Then } y \text{ is } B^1 \quad (2-4)$$

که A_i^1 و B^1 به ترتیب مجموعه های فازی در $U_i \subset R$ و $V \subset R$ هستند و $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U$ و $y \in V$ به ترتیب متغیرهای ورودی و خروجی (زبانی) سیستم فازی می باشند. فرض کنید M تعداد

¹ -Fuzzy Rule Base

قواعد موجود در پایگاه قواعد فازی باشد یعنی $l = 1, 2, \dots, M$. ما قواعدی به شکل (۲-۴) را قواعد کانونیک^۱ می‌نامیم.

۲-۳-۴ موتور استنتاج فازی

با توجه به توضیحات بخش قبل، یک سیستم منطقی همه قواعد را به ازای ورودی‌ها بررسی می‌نماید و خروجی مربوط را محاسبه می‌نماید. سیستمی که قواعد را بررسی می‌نماید و خروجی را تعیین می‌نماید، موتور استنتاج فازی نامیده می‌شود.

در حالت کلی دو روش مختلف برای طراحی موتور استنتاج وجود دارد. استنتاج مبتنی بر ترکیب قواعد و استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه. در استنتاج مبتنی بر ترکیب قواعد، تمامی قواعد موجود در پایگاه قواعد فازی در یک رابطه فازی ترکیب شده و آنگاه بدیده یک قاعده اگر- آنگاه فازی تنها نگریسته می‌شود اما در استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه، هر قاعده در پایگاه قواعد فازی یک خروجی فازی را معین کرده و خروجی نهایی، ترکیب M خروجی جداگانه مجموعه‌های فازی خواهد بود. در اینجا فرمول‌های تعدادی از موتورهای استنتاج را که عموماً در سیستم‌های فازی و کنترل فازی استفاده می‌شوند نشان می‌دهیم که همه روابط از این قرار هستند که با داشتن مجموعه فازی A^* در ورودی، موتورهای استنتاج مجموعه فازی B^* را در خروجی ایجاد می‌کنند [۳۸ و ۳۹].

۱- **موتور استنتاج حاصلضرب:** این موتور استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه می‌باشد که بطور

خلاصه رابطه ریاضی آن بصورت رابطه (۲-۴) می‌باشد.

$$\mu_{B^*}(y) = \max_{l=1}^M \left[\sup_{x \in U} \mu_{A^*}(x) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \mu_{B^l}(y) \right] \quad (3-4)$$

۲- **موتور استنتاج مینیمم:** موتور استنتاج مینیمم هم مانند موتور استنتاج حاصلضرب مبتنی

بر قواعد جداگانه بوده که به صورت زیر فرموله می‌شود.

$$\mu_{B^*}(y) = \max_{l=1}^M \left[\sup_{x \in U} \min (\mu_{A^*}(x), \mu_{A_1^l}(x_1), \dots, \mu_{A_n^l}(x_n) \mu_{B^l}(y)) \right] \quad (4-4)$$

¹ -Canonical

موتورهای استنتاج حاصلضرب و مینیمم مهمترین موتورهای استنتاج مورد استفاده در سیستم‌های فازی و کنترل فازی هستند. مهمترین مزیت آنها در سادگی محاسباتشان می‌باشد. این مسئله بخصوص در مورد، موتور استنتاج حاصلضرب برقرار است، ضمن اینکه برای بسیاری از کاربردهای عملی بخصوص برای کنترل فازی معنای خاصی دارند.

۱- **فازی‌ساز:** اطلاعات صریح حاصل از محیط واقعی را به صورت اطلاعات فازی درآورده و آماده پردازش در سیستم فازی می‌کند.

۲- **موتور استنتاج^۱:** بر اساس اطلاعات ورودی حاصل از فازی ساز و قوانین پیاده شده در پایگاه قواعد سیگنالی را به صورت اعداد فازی برای خروجی مهیا می‌کند.

۳- **غیرفازی ساز:** اعداد فازی حاصل از موتور استنتاج را به اعداد طبیعی برای استفاده در محیط واقعی تبدیل می‌کند.

۴- **پایگاه قواعد^۲:** در این مکان قوانین فازی به صورت اگر - آنگاه ذخیره می‌شوند.

هر کدام از این بخش‌ها دارای انواع متعددی هستند، که در ادامه توضیح داده می‌شوند، و با توجه به نوع بکار برده شده، سیستم فازی خاصی ایجاد می‌شود. به عنوان مثال، یک سیستم فازی با فازی ساز منفرد، موتور استنتاج ضرب، غیرفازی ساز میانگین مراکز، مطابق رابطه (۴-۵) توصیف می‌شود. توضیح کامل سیستم‌های فازی در [۳۸] آمده است.

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^m y^l \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i)} \quad (۴-۵)$$

که $\mu_{A_i^l}(x_i)$ توابع تعلق مربوط به ورودی‌ها، y^l مرکز مجموعه‌های فازی در نظر گرفته شده برای خروجی، n تعداد ورودی‌ها و m تعداد قوانین است.

10- Inference Engine
² Rule base

۴-۳-۲-۳ فازی سازها

از بخش‌های قبلی دریافتیم که موتور استنتاج فازی، قواعد موجود در پایگاه قواعد فازی را بوسیله یک نگاشت از مجموعه فازی A^* در ورودی به مجموعه فازی B^* در خروجی ترکیب می‌کند بدلیل اینکه در اغلب کاربردها ورودی و خروجی سیستم فازی اعداد حقیقی هستند، باید از واسطه‌هایی بین موتور استنتاج فازی و محیط استفاده کنیم این واسطه‌ها در ورودی همان فازی سازها هستند که بعنوان نگاشتی از یک نقطه $X^* \in U \in R^n$ به یک مجموعه فازی A^* در U تعریف شده است که در زیر به معرفی سه نوع فازی ساز می‌پردازیم.

۱- **فازی‌ساز منفرد**^۱: فازی ساز منفرد یک نقطه $X^* \in U$ با مقدار حقیقی را به یک نقطه منفرد فازی A^* در U می‌نگارد که مقدار تعلق در نقطه X^* برابر با ۱ و در سایر نقاط U برابر با صفر می‌باشد، یعنی:

$$\mu_{A^*}(x) = \begin{cases} 1 & : X = X^* \\ 0 & : other \end{cases} \quad (۴-۶)$$

۲- **فازی ساز گوسین**^۲: فازی ساز گوسین نقطه $X^* \in U$ را به مجموعه فازی A^* در U با تابع تعلق گوسین زیر می‌نگارد:

$$\mu_{A^*}(x) = e^{-\left[\frac{x_1 - x_1^*}{a_1}\right]^2} \times \dots \times e^{-\left[\frac{x_n - x_n^*}{a_n}\right]^2} \quad (۴-۷)$$

۳- **فازی ساز مثلثی**^۳: فازی ساز مثلثی نقطه $X^* \in U$ را به مجموعه فازی A^* در U با تابع تعلق مثلثی زیر می‌نگارد:

$$\mu_{A^*}(x) = \begin{cases} \left[1 - \frac{x_1 - x_1^*}{b_1}\right] \times \dots \times \left[1 - \frac{x_n - x_n^*}{b_n}\right] & : |x_i - x_i^*| \leq b_i \\ 0 & : other \end{cases} \quad (۴-۸)$$

^۱ - Singleton Fuzzifier

^۲ - Gaussian Fuzzifier

^۳ -Triangular Fuzzifier

از روابط (۴-۶)، (۴-۷) و (۴-۸) مشاهده می‌شود که هر سه فازی ساز رابطه $\mu_{A^*}(x^*) = 1$ را ارضاء می‌کنند، یعنی اینکه نگاشت این توابع تعلق به صورتی است که مقدار تابع تعلق مجموعه فازی $\mu_{A^*}(x)$ در نقطه $X = X^*$ بیشترین مقدار را دارد.

۴-۳-۴ غیرفازی سازها

غیر فازی ساز بعنوان یک نگاشت از مجموعه فازی B^* در $V \subset R$ (که خروجی موتور استنتاج فازی است) به یک نقطه قطعی $y^* \in V$ تعریف می‌گردد. بطور مفهومی، وظیفه فازی‌ساز مشخص کردن نقطه‌ای است که بهترین نماینده مجموعه فازی B^* باشد. این موضوع مشابه مقدار میانگین یک متغیر تصادفی می‌باشد. با این حال از آنجا که مجموعه فازی B^* به طرق مختلفی شناخته می‌شود انتخاب-های مختلفی برای این نقطه وجود دارد. در ادامه بحث به معرفی سه نوع غیرفازی ساز می‌پردازیم. برای تمام این غیرفازی سازها، فرض می‌کنیم که مجموعه فازی B^* بوسیله یکی از موتورهای استنتاج فازی معرفی شده در بخش‌های قبلی بدست آمده است.

۱- غیرفازی ساز مرکز ثقل^۱: غیرفازی ساز مرکز ثقل، نقطه y^* را بعنوان مرکز ناحیه‌ای که

بوسیله تابع تعلق B^* پوشش داده شده، تعریف می‌کند. بدین معنا که:

$$y^* = \frac{\int y \mu_{B^*}(y) dy}{\int \mu_{B^*}(y) dy} \quad (۹-۴)$$

مزیت غیر فازی ساز مرکز ثقل در توجیه پذیری شهودی آن بوده و اشکال آن در پیچیدگی محاسبات آن می‌باشد. در حقیقت، تابع تعلق $\mu_{B^*}(y)$ معمولاً یک تابع بی‌قاعده و غیرمتعارف می‌باشد، بنابراین محاسبه انتگرال (۹-۴) بسیار مشکل خواهد بود.

۲- غیرفازی‌ساز میانگین مراکز^۲: از آنجا که مجموعه فازی B^* ، اجتماع یا اشتراک M

مجموعه فازی با وزن‌هایی برابر با ارتفاع مجموعه‌های فازی متناظر می‌باشد. بطور مشخص،

^۱ - Center of Gravity Defuzzifier

^۲ - Center Average Defuzzifier

فرض کنید y^{-l} ، مرکز مجموعه فازی l ام و w_l درجه ارتفاع آن باشد، غیرفازی ساز میانگین

مراکز y^* را بدین ترتیب تعریف می‌کند:

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M y^{-l} w_l}{\sum_{l=1}^M w_l} \quad (10-4)$$

غیرفازی ساز میانگین مراکز متداول‌ترین غیرفازی ساز مورد استفاده در سیستم‌های فازی و کنترل فازی می‌باشد. همچنین تغییرات کوچک در y^{-l} و w_l تغییرات کوچکی را در y^* نتیجه می‌دهد.

۳- **غیرفازی ساز ماکزیمم^۱**: غیرفازی ساز ماکزیمم نقطه y^* را بعنوان نقطه‌ای که در V که

$\mu_{B^*}(y)$ به مقدار ماکزیمم خودش می‌رسد، تعریف می‌کند. مجموعه زیر را در نظر بگیرید

$$\text{hgt}(B^*) = \{y \in V \mid \mu_{B^*}(y) = \sup_{y \in V} \mu_{B^*}(y)\} \quad (11-4)$$

بدین معنی که $\text{hgt}(B^*)$ مجموعه تمام نقاطی که از مجموعه V است که در آنها $\mu_{B^*}(y)$ به ماکزیمم

مقدار خود می‌رسد. غیرفازی ساز ماکزیمم، نقطه y^* را بعنوان یک عضو دلخواه $\text{hgt}(B^*)$ تعریف می‌-

کند. اگر $\text{hgt}(B^*)$ شامل یک نقطه باشد، آنگاه y^* به شکل واحدی تعریف می‌شود. اگر $\text{hgt}(B^*)$

شامل بیش از یک نقطه باشد، آنگاه هنوز نقطه y^* بعنوان یک عضو دلخواه $\text{hgt}(B^*)$ تعریف می‌شود،

یا اینکه از کوچکترین ماکزیمم، بزرگترین ماکزیمم یا میانگین ماکزیمم استفاده کنیم.

بطور دقیق‌تر غیرفازی ساز کوچکترین ماکزیمم بدین شکل تعریف می‌شود:

$$y^* = \inf\{y \in \text{hgt}(B^*)\} \quad (12-4)$$

برای غیرفازی ساز بزرگترین ماکزیمم داریم:

$$y^* = \sup\{y \in \text{hgt}(B^*)\} \quad (13-4)$$

و غیرفازی ساز میانگین ماکزیمم عبارت است از:

¹ - Maximum Defuzzifier

$$y^* = \frac{\int_{hgt(B^*)} y dy}{\int_{hgt(B^*)} dy} \quad (۱۴-۴)$$

که $\int_{hgt(B^*)} dy$ برای بخش پیوسته $hgt(B^*)$ همان انتگرال متداول و برای بخش گسسته $hgt(B^*)$ همان جمع می‌باشد. احساس می‌شود که غیرفازی ساز میانگین ماکزیمم ممکن است نتایجی را به ما بدهد که با درکی که از ماکزیمم تعلق داریم، متناقض باشد. اما غیرفازی سازهای ماکزیمم از لحاظ شهودی توجیه پذیر بوده، ضمن اینکه از نظر محاسباتی ساده می‌باشد. با این حال تغییرات کوچک در B^* ممکن است باعث تغییرات بزرگ در y^* گردد.

به عنوان نتیجه‌گیری برای این بخش، لازم است بر روی یک مشخصه سیستم‌های فازی تاکید نماییم. سیستم‌های فازی از یک سو نگاشت‌هایی به صورت چند ورودی و یک خروجی از یک بردار با مقادیر حقیقی به یک اسکالر با مقادیر حقیقی بوده (نگاشت چند خروجی را می‌توان با ترکیب چند نگاشت یک خروجی بوجود آورد) که روابط دقیق ریاضی این نگاشت‌ها را می‌توان بدست آورد و از سوی دیگر سیستم‌های فازی سیستم‌های فازی مبتنی بر دانش بوده که از روی دانش بشری به شکل قواعد اگر-آنگاه ساخته می‌شوند. جنبه مهم تئوری سیستم‌های فازی این است که یک فرایند سیستماتیک برای تبدیل یک پایگاه دانش به یک نگاشت غیرخطی فراهم می‌سازد. به همین دلیل ما قادر خواهیم بود که از سیستم‌های مبتنی بر دانش (سیستم‌های فازی) در کاربردهای مهندسی (نظیر کنترل، پردازش سیگنال، سیستم‌های مخابراتی و...) استفاده نماییم. همچنین از آنجا که ما می‌توانیم از مدل‌های ریاضی استفاده کنیم، در نتیجه تجزیه، تحلیل و طراحی سیستم‌ها را می‌توان به صورت یک مدل ریاضی انجام داد. [۴۰ و ۳۸]

۴-۴ طراحی کنترل‌کننده فازی برای مولد بخار

در این قسمت، به روند طراحی کنترل‌کننده فازی با یادگیری از نوع first-order sogeno، برای کنترل سطح آب مولد بخار خواهیم پرداخت. اولین مرحله طراحی، تعریف متغیرهای زبانی بکار رفته

در قسمت مقدم قواعد فازی و تعیین توابع عضویت بکار رفته برای آنها می‌باشد. البته، تعداد متغیرهای زبانی بکار رفته را نیز باید به نحو مطلوبی انتخاب کرد تا بتواند تمامی حالت متغیرهای ورودی را به طور مناسب پوشش دهند. هدف اصلی، استفاده از کمترین تعداد قوانین و متغیر زبانی است تا در حد امکان ساختار کنترل‌کننده ساده‌تر بوده و از نظر حجم محاسبات انجام گرفته در آن برای کاربردهای زمان حقیقی یا بلادرنگ، مناسب‌تر باشد.

ورودی‌های کنترل‌کننده فازی خطا و مشتق خطا می‌باشند. در طراحی کنترل‌کننده فازی کمترین تعداد متغیر زبانی ممکن برای یک سیگنال ۳ می‌باشد، که مقدار آنرا با عبارت مثبت، صفر و منفی توصیف می‌کند. ما نیز سعی می‌کنیم طراحی را با استفاده از ۳ متغیر زبانی برای خطا و مشتق خطا انجام دهیم. ورودی‌های خطا و مشتق خطا، را با قرار دادن بهره‌های مناسب به بازه $[-1, 1]$ نگاشته می‌شوند، این ورودی‌ها ابتدا به قسمت فازی‌ساز وارد می‌شوند، تا برای هر ورودی یک تابع تعلق اختصاص داده شود، همچنین متغیرهای زبانی و توابع عضویت آنها را یکسان تعریف می‌کنیم. با توجه به مقدمات ذکر شده از سه متغیر زبانی منفی (N)، صفر (Z)، مثبت (P) برای خطا و مشتق خطا استفاده می‌کنیم با توجه به رفتار نرم تابع تعلق گوسی از این تابع تعلق برای متغیر زبانی صفر استفاده شده است، همچنین توابع تعلق سیگموئیدی فضای بیشتری از ورودی‌ها را در بر می‌گیرند، بنابراین متغیر-های زبانی منفی و مثبت از این نوع انتخاب شده‌اند.

در رابطه (۴-۱۵) شکل کلی یک تابع گوسی نشان داده شده است .

$$\mu(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (15-4)$$

در این رابطه c مرکز تابع تعلق گوسی و σ واریانس آن می باشد.

تابع سیگموئیدی نیز به صورت رابطه (۴-۱۶) تعریف می شود.

$$\mu(x) = \frac{1}{1+e^{-a(x-c)}} \quad (16-4)$$

که در آن پارامتر c تعیین کننده مرکز انحنای منحنی می باشد و a مقدار انحنای منحنی را در نقطه انحنای را تعیین می کند. با توجه به سه متغیر انتخاب شده برای خطا و مشتق آن ۹ قانون در پایگاه قواعد فازی به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\text{If } e \text{ is } N \text{ and } \dot{e} \text{ is } N \text{ then } y_1 = a_1 e + b_1 \dot{e} + c_1$$

$$\text{If } e \text{ is } N \text{ and } \dot{e} \text{ is } Z \text{ then } y_2 = a_2 e + b_2 \dot{e} + c_2$$

$$\text{If } e \text{ is } N \text{ and } \dot{e} \text{ is } P \text{ then } y_3 = a_3 e + b_3 \dot{e} + c_3$$

$$\text{If } e \text{ is } Z \text{ and } \dot{e} \text{ is } N \text{ then } y_4 = a_4 e + b_4 \dot{e} + c_4$$

$$\text{If } e \text{ is } Z \text{ and } \dot{e} \text{ is } P \text{ then } y_5 = a_5 e + b_5 \dot{e} + c_5$$

$$\text{If } e \text{ is } Z \text{ and } \dot{e} \text{ is } Z \text{ then } y_6 = a_6 e + b_6 \dot{e} + c_6$$

$$\text{If } e \text{ is } P \text{ and } \dot{e} \text{ is } N \text{ then } y_7 = a_7 e + b_7 \dot{e} + c_7$$

$$\text{If } e \text{ is } P \text{ and } \dot{e} \text{ is } Z \text{ then } y_8 = a_8 e + b_8 \dot{e} + c_8$$

$$\text{If } e \text{ is } P \text{ and } \dot{e} \text{ is } P \text{ then } y_9 = a_9 e + b_9 \dot{e} + c_9$$

در همه قوانین موجود به صورت آزمون و خطا، مقادیر ضرایب، $a_i = 1$ و $b_i = 1/2$ انتخاب شده اند، و ضریب c_i را هم به صورت یک بهره مستقیم جهت از بین بردن خطای حالت دائم صفر در نظر گرفته شده است. از عملگر t -norm برای تبدیل قسمت مقدم قوانین فازی به عبارت ریاضی (تشکیل مجموعه فازی ورودی^۱) استفاده شده است. این عملگر می تواند به یکی از دو صورت رابطه (۴-۱۷) بیان شود.

$$\mu_j(e, \dot{e}) = \begin{cases} \min[\mu_j(e), \mu_j(\dot{e})] \\ \text{or} \\ \mu_j(e) * \mu_j(\dot{e}) \end{cases}, j = 1, \dots, 9 \quad (4-17)$$

در رابطه فوق j شماره قانون مربوطه و μ_j تابع تعلق ورودی مربوطه در قانون زبانی λ_m است. در اینجا از عملگر ضرب برای محاسبه t -norm استفاده شده است. در اکثر کاربردهای کنترل، ورودی کنترل

¹ - Antecedent fuzzy set

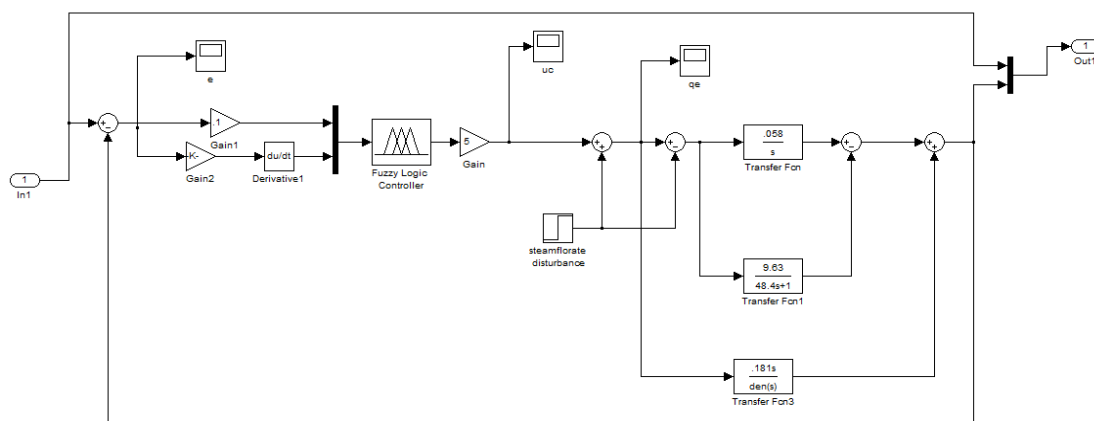
کننده را خطا و مشتق خطا در نظر می‌گیرند. در این حالت، قوانین سوگنو به صورت زیر تبدیل می‌شوند.

$$\text{If } e \text{ is } A \text{ and } \dot{e} \text{ is } B \text{ then } y = a_i e + b_i \dot{e} + c_i \quad (18-4)$$

همانگونه که از رابطه (18-4) معلوم است، این قسمت به صورت یک سیستم کنترلی PD عمل می‌کند. سیستم‌های کنترل کننده PD از دیر باز مورد استفاده بوده و از پرکاربردترین روش‌های در صنعت می‌باشند. در حالی که ورودی کنترل کننده، خطا و مشتق خطا باشد، قسمت قانون به صورت یک کنترل کننده PD عمل می‌کند، در این صورت کنترل کننده فازی به صورت مجموعه‌ای از کنترل کننده های PD عمل می‌کند.

۴-۵ شبیه سازی کنترل کننده فازی مولد بخار در محیط سیمولینک^۱

در این بخش به چگونگی شبیه‌سازی مولد بخار و کنترل کننده فازی در محیط شبیه ساز سیمولینک نرم افزار متلب می‌پردازیم. در شکل (۱-۴)، بدنه اصلی مدل شبیه سازی شده مولد بخار، همراه با حلقه کنترلی در نظر گرفته شده برای آن نشان داده شده است.



شکل (۱-۴) بدنه اصلی مدل شبیه سازی شده مولد بخار در سیمولینک

¹ - Simulink

همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود از خروجی مولد بخار فیدبک گرفته شده، و از اختلاف set point با این سیگنال، سیگنال خطا تولید شده است. در فاز طراحی کنترل‌کننده فازی از سیگنال های خطا و مشتق خطا استفاده شده، که این سیگنال‌ها به بلوک فازی اعمال شده‌اند، در نهایت خروجی کنترل‌کننده فازی سیگنال کنترلی می‌باشد، که این سیگنال کنترلی پس از جمع شدن با دبی بخار خروجی q_v ، دبی آب تغذیه q_e ، را تشکیل می‌دهند.

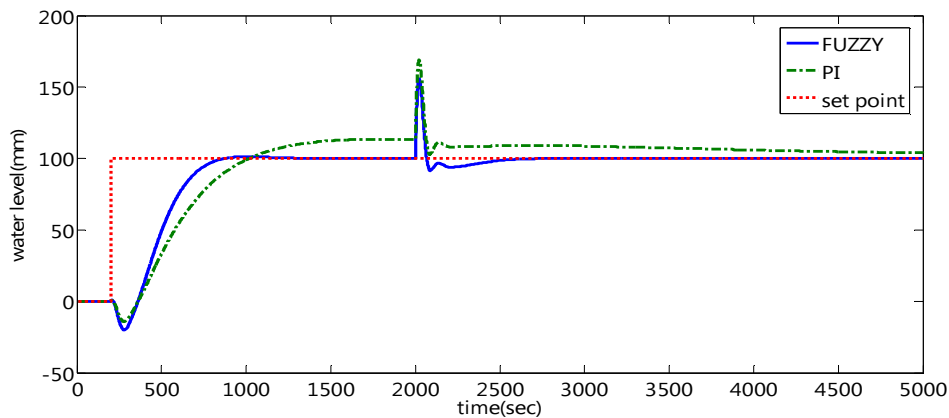
۴-۶ مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌های کلاسیک و فازی

در این قسمت نتایج بدست آمده از عملکرد کنترل‌کننده فازی طراحی شده برای مولد بخار را مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهیم. نتایج فوق را با کنترل‌کننده کلاسیک طراحی شده در فصل سوم مورد مقایسه قرار خواهیم داد. ساختار بکار رفته به منظور مقایسه کنترل‌کننده کلاسیک، یک کنترل‌کننده PI، می‌باشد تمامی کنترل‌کننده‌ها برای کنترل سطح آب مولد بخار برای تمام قدرت‌های کاری طراحی شده‌اند. مقدار مرجع سطح آب برابر ۱۰۰ میلیمتر انتخاب شده، و به صورت پله‌ای در لحظه ۲۰۰ ثانیه به سیستم اعمال شده است.

با در نظر گرفتن حلقه کنترلی بکار رفته برای مولد بخار، اثر اعمال اغتشاش به سیستم را نمی‌توان بدون در نظر گرفتن جمله سوم تابع تبدیل مولد بخار در سیستم ملاحظه کرد. این جمله، مربوط به نوسانات مکانیکی ناشی از افزایش دبی آب تغذیه ورودی به سیستم، در هنگام اعمال اغتشاش است. و با توجه به این نکته که در این لحظه، دبی آب تغذیه ورودی به اندازه دبی بخار خروجی افزایش می‌یابد، باید این جمله اعمال شود. برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده بر اغتشاش‌های اعمالی خارجی، اغتشاشی معادل ۵ درصد دبی بخار اسمی در قدرت پنجاه درصد، یعنی به اندازه $30(\frac{kg}{s})$ در لحظه ۲۰۰ ثانیه، به سیستم اعمال شده است.

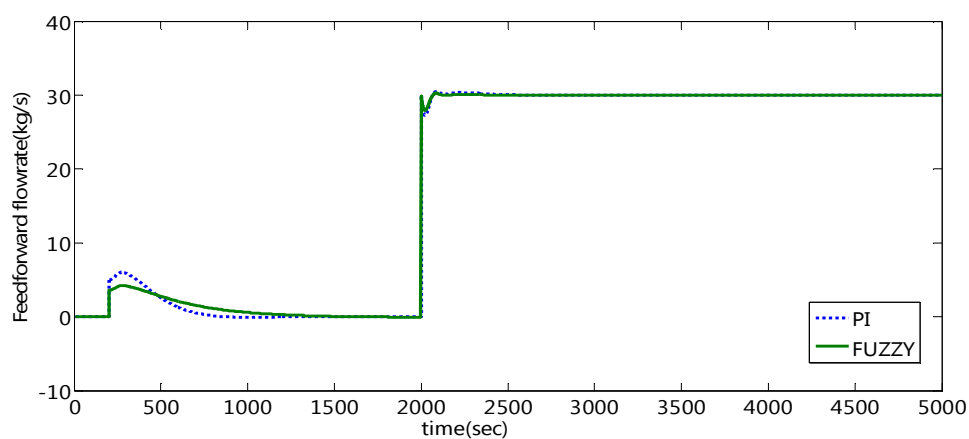
۴-۶-۱ عملکرد کنترل کننده فازی در سطح قدرت ۵ درصد

پاسخ پله کنترل کننده در سطح قدرت ۵ درصد در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲) پاسخ پله کنترل کننده فازی و PI در سطح قدرت ۵ درصد

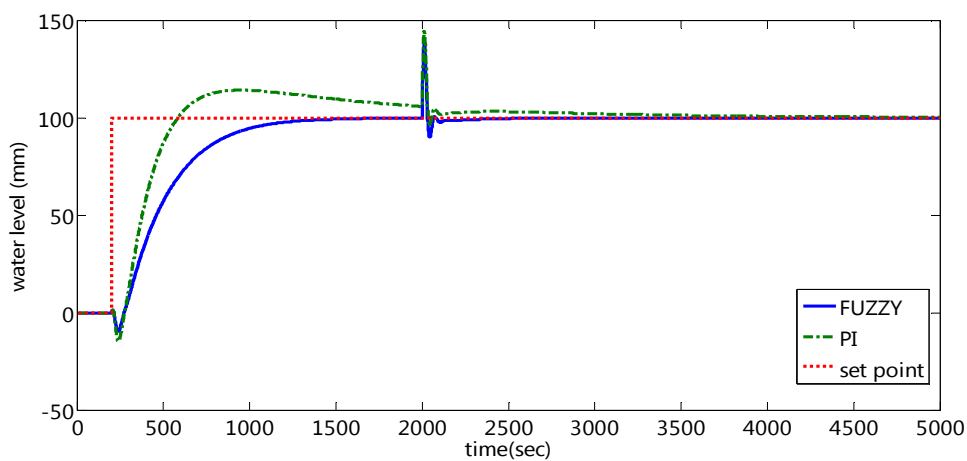
همانطور که در شکل دیده می شود، کنترل کننده فازی دارای درصد فراجش کمتری نسبت کنترل کننده PI پیشنهادی است. این یک مزیت مهم و مطلوب به شمار می رود. بررسی اثر اغتشاش اعمال شده نشان می دهد، کنترل کننده پیشنهادی دارای عملکرد بهتری در دفع اثر اغتشاش می باشد. در شکل (۴-۳) بررسی سیگنال آب تغذیه اعمالی به مولد بخار به سیستم را در سطح قدرت، ۵ درصد را ملاحظه کنید. دیده می شود که سیگنال دبی آب تغذیه، دارای نرخ تغییرات بسیار کمتری نسبت به کنترل کننده PI، می باشد. این خود یک مزیت مهم برای شیرهای بکار رفته برای اعمال تغییرات مورد نیاز محسوب می شود.



شکل (۳-۴) آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطح قدرت ۵ درصد

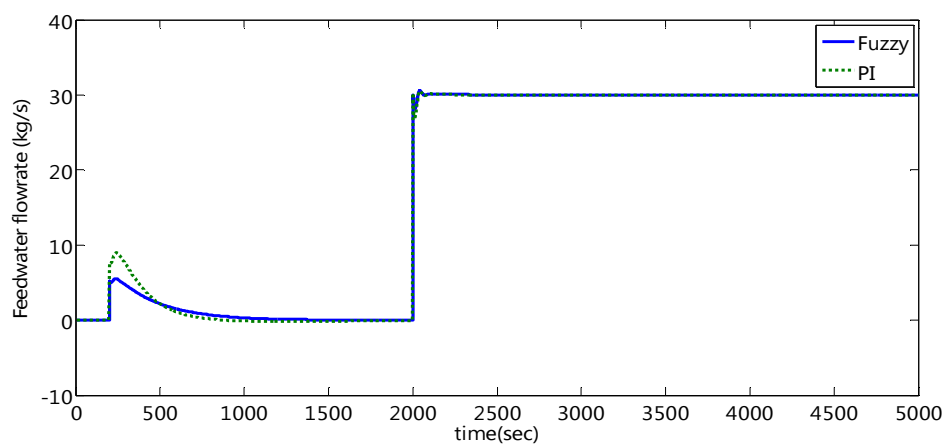
۲-۶-۴ عملکرد کنترل کننده فازی در سطح قدرت ۱۵ درصد

پاسخ پله کنترل کننده فازی در سطح قدرت ۱۵ درصد و واکنش آن در مواجهه با اعمال اغتشاش در شکل (۴-۴) و سیگنال آب تغذیه اعمال شده مربوطه نیز در شکل (۵-۴) نشان داده شده است.



شکل (۴-۴) پاسخ پله کنترل کننده فازی و PI در سطح قدرت ۱۵ درصد

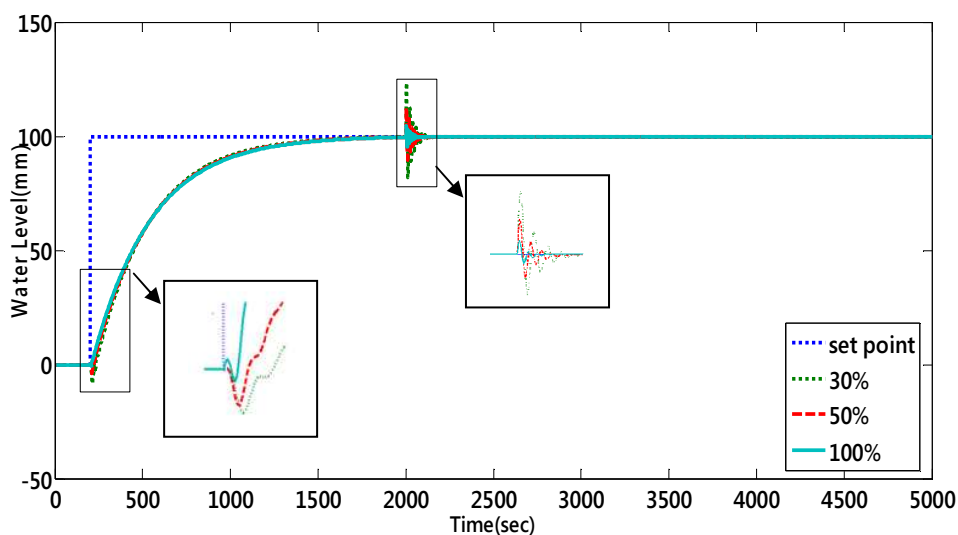
نتایج حاکی از عملکرد بهتر کنترل کننده فازی است.



شکل (۴-۵) آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطح قدرت ۱۵ درصد

۳-۶-۴ عملکرد کنترل کننده فازی در سطوح قدرت بالاتر

برای بررسی عملکرد کنترل کننده، پاسخ پله آن در سطوح قدرت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.

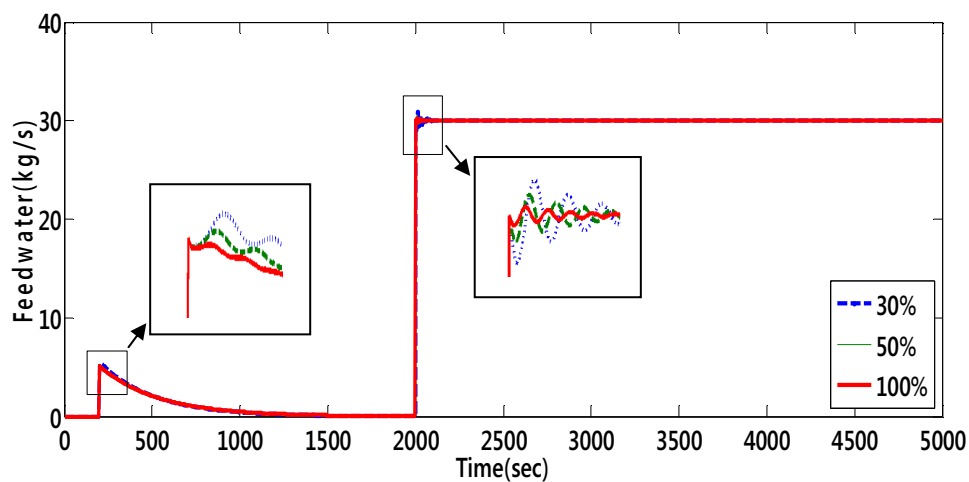


شکل (۴-۶) پاسخ پله کنترل کننده فازی در سطوح قدرت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد

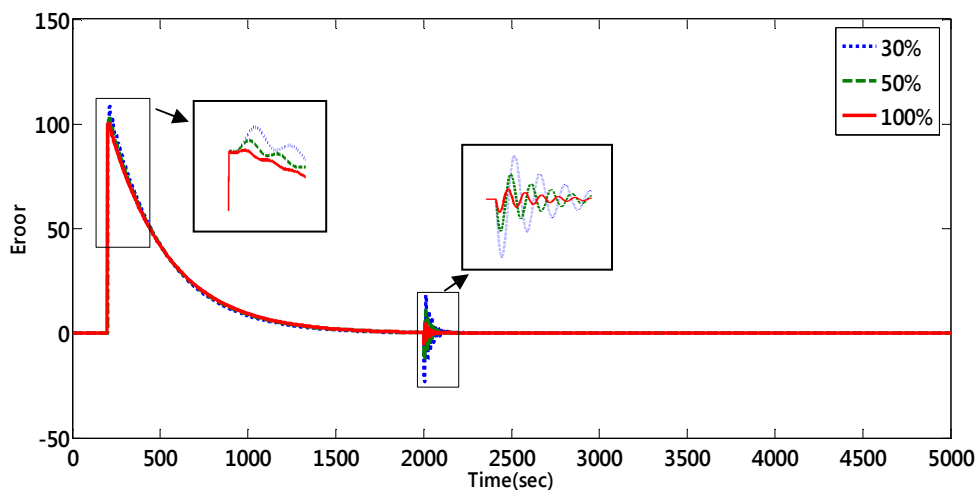
با توجه به کم بودن اثر پدیده انبساط و انقباض در قدرت‌های بالاتر، کنترل سطح آب در قدرت‌های بیشتر از ۳۰ درصد توسط کنترل کننده‌های کلاسیک انجام شده و پاسخ آنها رضایت‌بخش و مورد

قبول است، ولی بررسی شکل (۴-۶) نشان می‌دهد عملکرد کنترل‌کننده فازی در این سطوح قدرت نسبت به کنترل‌کننده PI طراحی شده در فصل قبل، بسیار بهتر و قابل توجه‌تر از آنهاست. درصد فروجهش کاهش یافته و کنترل‌کننده بدون فراجهش و در کمترین زمان ممکن به سطح آب مطلوب می‌رسد. با توجه به بررسی‌های انجام شده پارامتر c_i ، را در قوانین سوگنو به صورت یک بهره مستقیم جهت از بین بردن خطای حالت دائم می‌توان در نظر گرفت.

همچنین در شکل (۴-۷) و شکل (۴-۸) آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار و سیگنال خطا در سطوح قدرت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد نشان داده شده است. دیده می‌شود که سیگنال دبی آب تغذیه، دارای نرخ تغییرات بسیار کمتری نسبت به کنترل‌کننده PI، می‌باشد. که این برای شیرهای آب تغذیه بسیار مهم است.



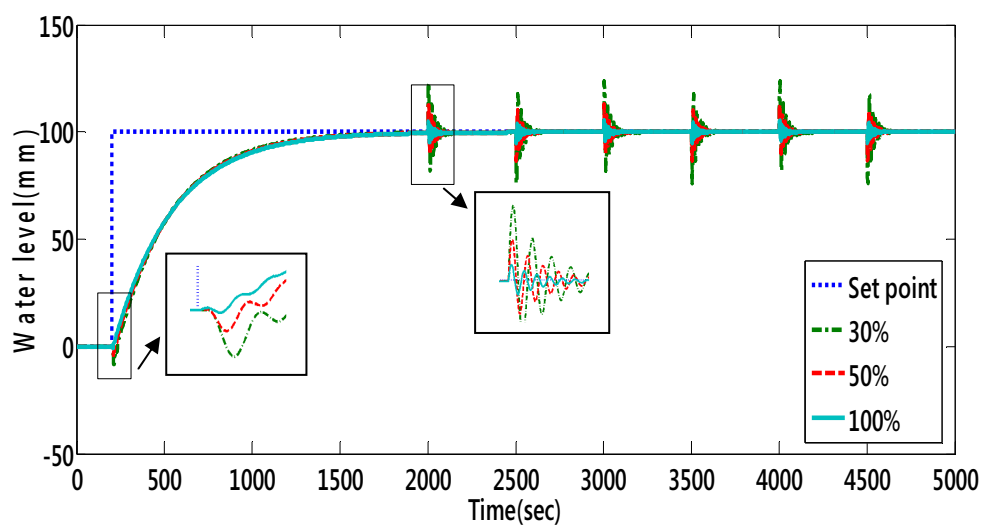
شکل (۴-۷) آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطوح قدرت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد



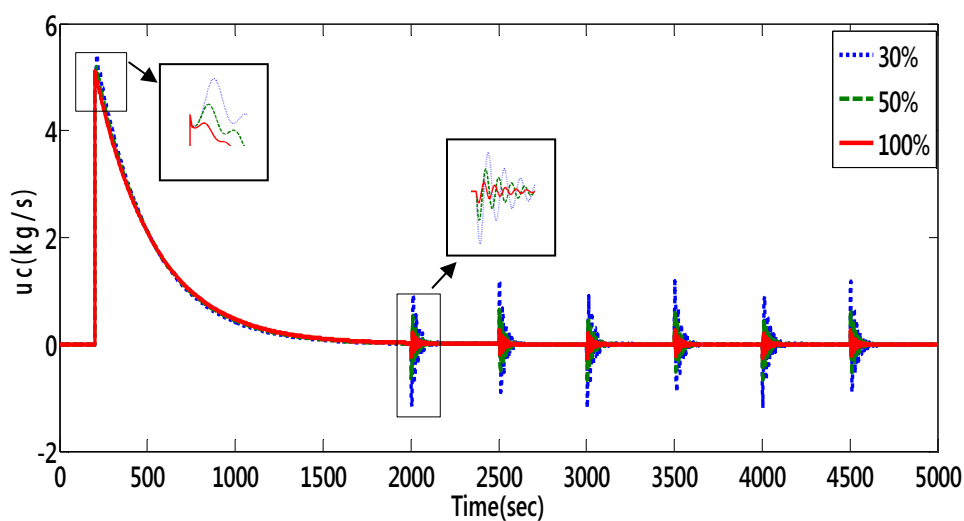
شکل (۴-۸) سیگنال خطا

۴-۶-۴ اعمال اغتشاش به مولد بخار به صورت تناوبی

پاسخ پله کنترل کننده فازی در سطوح قدرت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد و واکنش آن در مواجهه با اعمال اغتشاش در شکل (۴-۹) و سیگنال کنترلی اعمال شده به مولد بخار در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. در اینجا اغتشاش اعمال شده به صورت تناوبی به سیستم اعمال می‌کنیم، اغتشاش فلو بخار را در لحظه ۲۰۰۰ ثانیه به اندازه $30 \left(\frac{kg}{s}\right)$ ، به صورت افزایشی به سیستم اعمال شده است. و بعد از گذشت ۵۰۰ ثانیه یعنی در زمان در لحظه ۲۵۰۰ ثانیه اغتشاش فلو بخار به اندازه $30 \left(\frac{kg}{s}\right)$ ، به صورت کاهشی به سیستم اعمال شده است. بررسی اثر اغتشاش اعمال شده نشان می‌دهد، کنترل کننده پیشنهادی دارای عملکرد مطلوبی در دفع اثر اغتشاش می‌باشد، و کنترل کننده فازی دارای عملکرد مطلوبی است. همچنین سیگنال کنترلی بعد از گذشت ۱۵۰۰ ثانیه به صفر می‌رسد. همانطور که در شکل‌ها نشان داده شده است با افزایش قدرت مولد بخار درصد فراجاهش و فروجهش، پاسخ پله کنترل کننده کمتر می‌شود، و کنترل کننده در سطوح قدرت بالاتر دارای عملکرد مطلوبتری نسبت به قدرت‌های پایین است.



شکل (۴-۹) پاسخ پله کنترل کننده فازی در برابر اغتشاش تناوبی



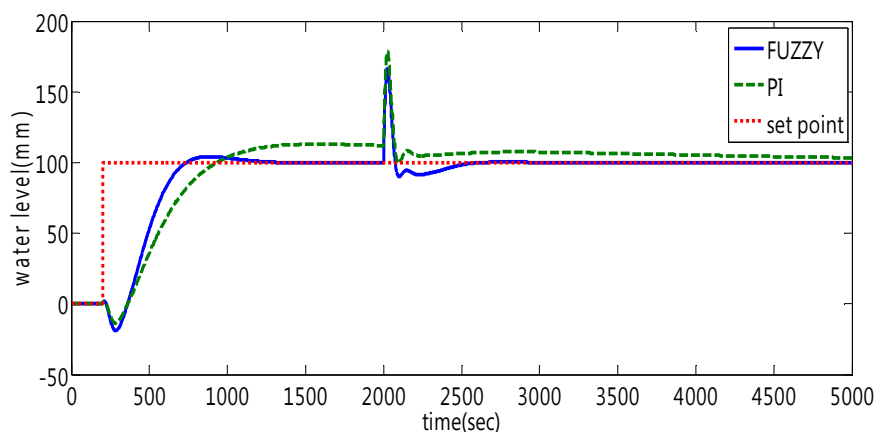
شکل (۴-۱۰) سیگنال کنترلی اعمال شده به مولد بخار

۷-۴ بررسی پایدار^۱ بودن کنترل کننده در برابر تغییر در پارامترهای مدل

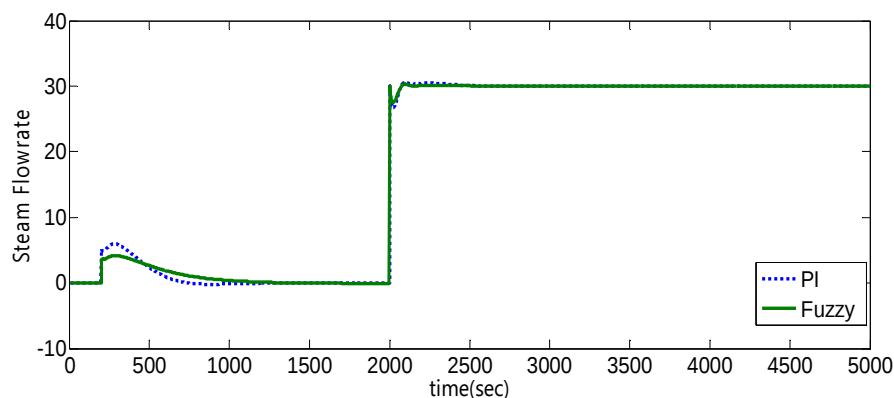
یکی از مهمترین مسائل در زمینه طراحی کنترل کننده بر پایه مدل، بررسی عملکرد آن در برابر تغییر در پارامترهای در مدل است. کنترل کننده در مواجهه با این تغییرات، باید بتواند عملکرد مناسبی از

^۱ - Stabile

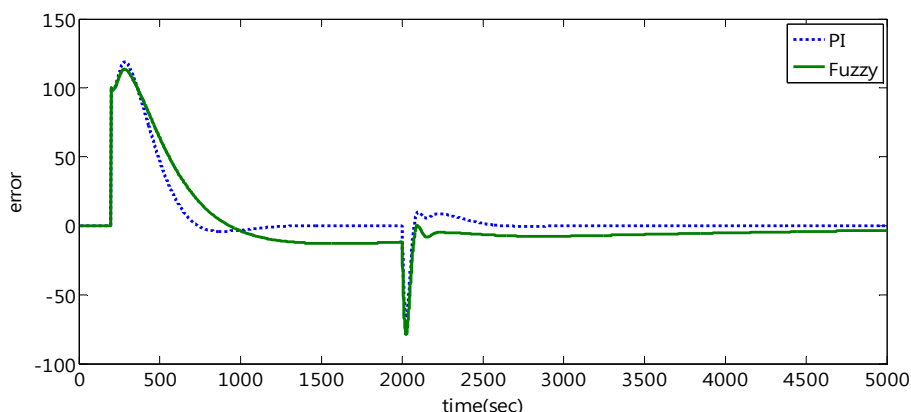
خود بروز داده و از محدوده‌های پایداری سیستم عبور نکند. با بیان مقدمه فوق، و برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده، پارامترهای آنرا به میزان $\pm 10\%$ درصد، حول مقدار نامی آنها تغییر داده و عملکرد کنترل-کننده را مورد بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به زیاد بودن اثر انبساط و انقباض در سطح قدرت پنج درصد، پاسخ کنترل‌کننده به این تغییر در پارامترها در این سطح قدرت، مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شکل (۱۱-۴) سطح آب و در شکل‌های (۱۲-۴) و (۱۳-۴) سیگنال آب تغذیه خروجی و خطا نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با وجود عدم این تغییرات لحاظ شده کنترل‌کننده دارای پاسخ مطلوبی است.



شکل (۱۱-۴) پاسخ پله کنترل‌کننده فازی در برابر تغییر در پارامترهای مدل



شکل (۱۲-۴) آب تغذیه اعمال شده به مولد بخار در سطح قدرت ۵ درصد



شکل (۴-۱۳) خطا خروجی در سطح قدرت ۵ درصد

۸-۴ نتیجه‌گیری

در این فصل به طراحی کنترل‌کننده فازی برای کنترل سطح آب در مولدهای بخار هسته‌ای پرداختیم، ساختار کنترل‌کننده ساده بوده و کمترین قانون در قسمت قواعد فازی آن بکار رفته است. از آنجا که عملکرد کنترل‌کننده سطح آب مولدهای بخار توسط چگونگی دنبال کردن خروجی مطلوب و پاسخ آن به اغتشاش‌های موجود در دبی بخار خروجی سنجیده می‌شود، پاسخ کنترل‌کننده را بر اساس پاسخ به این دو عامل بررسی شده است. پایدار بودن کنترل‌کننده در برابر تغییر در پارامترهای مدل بررسی شد، و با وجود تغییرات لحاظ شده کنترل‌کننده دارای پاسخ مطلوبی است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پروژه به بررسی الگوی جریان در مولدهای بخار عمودی پرداخته شد و نیز مدلی دینامیکی از مولد بخار که قابل اعمال بر انواع مختلف مولدهای بخار افقی و عمودی بوده که می‌تواند جایگزین مناسبی برای مولدهای بخار در گذرهای عملیاتی و جنبه‌های مختلف ترموهیدرولیکی آن باشد معرفی شد و همچنین طراحی کنترل‌کننده کلاسیک برای مولدهای بخار در تمام سطوح قدرت و بررسی و تحلیل مشکلات موجود در زمینه استفاده از این نوع کنترل‌کننده‌ها برای مولدهای بخار و بخصوص در قدرت‌های پایین کاری و طراحی کنترل‌کننده فازی برای مولد بخار و بهبود پاسخ سطح آب در قدرت‌های مختلف کاری از نقطه نظر عواملی مانند: درصد فروجهش، سرعت پاسخ و دفع اغتشاش در مقایسه با کنترل‌کننده کلاسیک انجام گرفت. این روش کنترلی برای مولدهای بخار بر اساس دینامیک‌های اساسی حاکم طراحی شده و وابستگی خاصی به نوع مولد بخار ندارد. همچنین امکان پیاده سازی عملی کنترل‌کننده به دلیل سادگی ساختار و کاهش حجم محاسبات انجام گرفته در آن وجود دارد. سادگی ساختار و کاهش حجم محاسبات انجام گرفته در کنترل‌کننده فازی برای مولدهای بخار آنرا برای کاربردهای بلادرنگ مطلوب می‌سازد. همچنین کنترل‌کننده دارای درجه مقاومت بسیار بالایی در مقابل تغییر در پارامترهای مدل می‌باشد. و سیگنال کنترلی آن دارای تغییرات بسیار ملایم‌تری نسبت به کنترل‌کننده‌های پیشنهادی دیگر بوده و از این حیث برای کاربرد های صنعتی مناسب می‌باشد.

۵-۲ پیشنهادها

- ۱- اجرای عملی کنترل‌کننده طراحی شده بر روی سیستم واقعی، با استفاده از آن به عنوان کنترل‌کننده در نرم افزارهایی که برای مدل سازی کل نیروگاه هسته‌ای بکار می‌روند، می‌تواند هرچه بیشتر مزایا و معایب روش ارائه شده را آشکار کند.

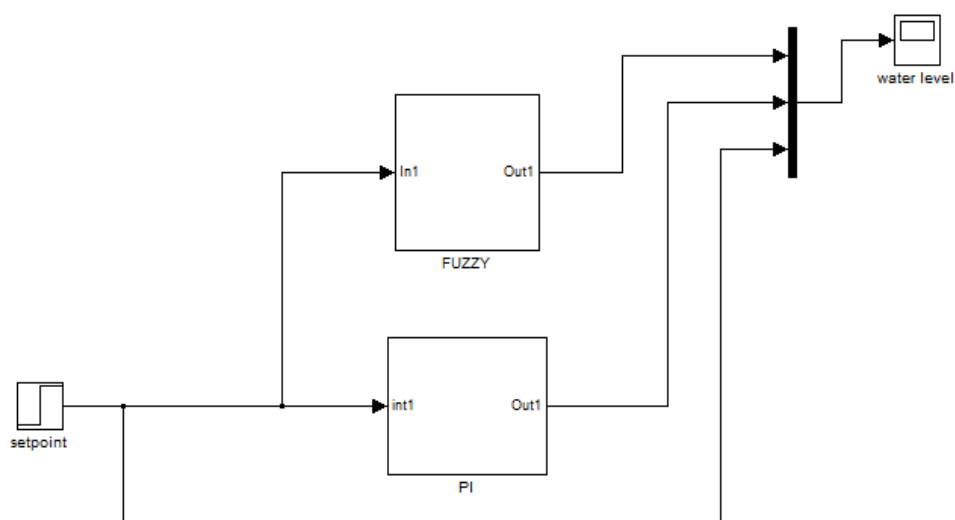
۲- با توجه به اینکه مسأله پایداری سیستم‌های کنترلی رابطه مستقیمی با کاربرد آنها در عمل دارد، اثبات پایداری روش کنترلی بکار رفته، می‌تواند گام مهمی در صنعتی کردن کنترل-کننده طراحی شده داشته باشد.

۳- بکار بردن ترکیبی از کنترل‌کننده فازی با روش‌های عصبی، تطبیقی، الگوریتم ژنتیک و ... همچنین تغییر پارامترهای مختلف گروه‌های فازی خروجی می‌توانیم شاهد پاسخ بهتری از کنترل‌کننده باشیم.

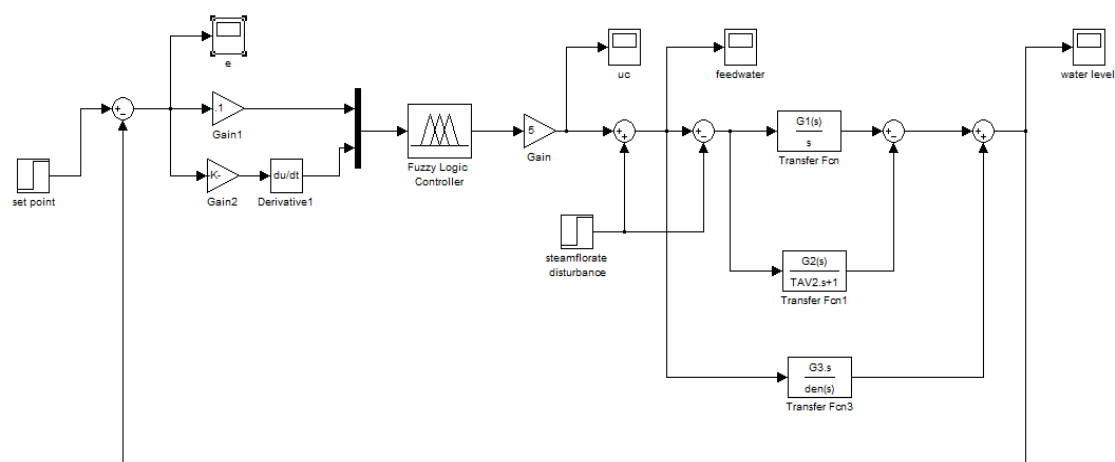
با احترام: احمد حسینی دی ماه ۹۰

ضمیمه الف

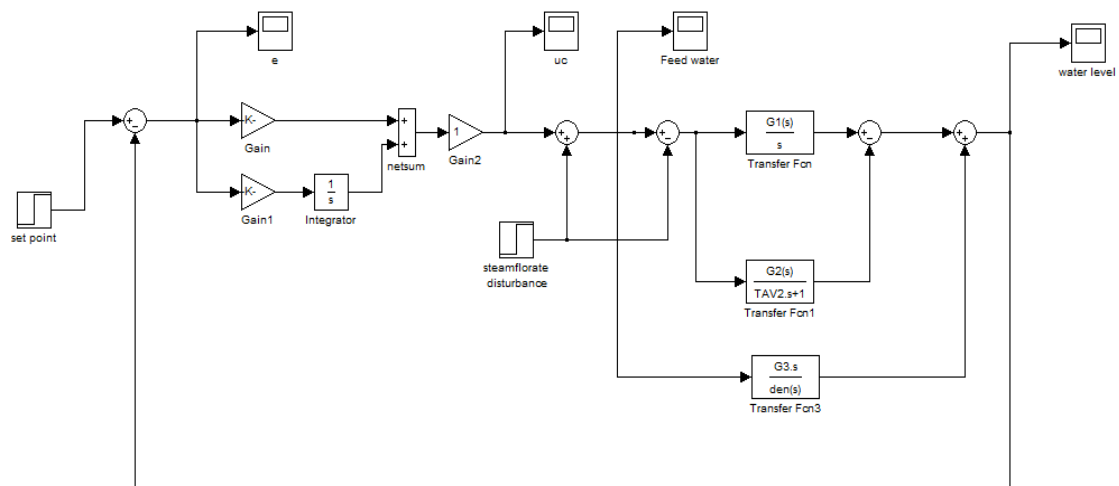
بخشی از بلوک‌های طراحی شده در simulink



شکل الف- ۱ - بدنه اصلی مدل شبیه سازی شده مولد بخار در سیمولینک



شکل الف- ۲ - طراحی کنترل کننده فازی مولد بخار



شکل الف-۳- طراحی کنترل کننده PI مولد بخار

- [۱] Wang M, Cheng Q, Cheng Y, Wang Y, (2010) "Model-Free Adaptive Control Method for Nuclear Steam Generator Water Level" International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation.
- [۲] Myung-Ki, Myoung Ho, Myung Jin (1999) "A gain-scheduled L2 control to nuclear steam generator water level" Annals of Nuclear Energy 26 905-916.
- [۳] Fakhrazari, A. and Boroushaki, M. (2008) "Adaptive Critic-based Neurofuzzy Controller for the Steam Generator Water Level". IEEE Transaction on Nuclear Science , vol. 55, no. 3, june.
- [۴] B. H. Cho and H. C. No, (1997) "Design of stability-Garanted Fuzzy logic Controller for Nuclear Steam Generator", IEEE Transaction on Nuclear Science , vol. 44, no. 3, pp. 1431 - 1441.
- [۵] M. V. Kotareh, b. Mettler , M . Morari , P. Bendotti, and C- M. Falinower, (2000) "Level Control in the Steam Generator of a Nuclear Power Plant ", IEEE Transaction on Control Systems Tecnology, vol. 8, no. 1, pp. 55-69.
- [۶] M. G. Na, (2003) "Design of an Adaptive predictive Controller for Steam Generator", IEEE Transaction on Nuclear Scince, vol . 50, no. 1, pp. 186 - 193.
- [۷] H. Eliasi, H. Davilu, M.B. Menhaj. (2007) "Adaptive fuzzy model based predictive control of nuclear steam generators" Nuclear Engineering and Design 237, 668-676
- [۸] Zhang Gui-feng(2010) "Study on Sliding Mode Fuzzy Control for the Subsystem of a Stream Generator" First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications.
- [۹] صفرزاده الف، (۱۳۸۸)، پایان نامه ارشد، " مدل سازی و کنترل سطح آب مولدهای بخار هسته‌ای به روش تئوری فیدبک کمی"، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی.
- [۱۰] مهدی‌زاده س، (۱۳۸۰) " **تجهیزات نیروگاه‌های پیشرفته** " جلد بیست و سوم، چاپ اول، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ص ۳۴.
- [۱۱] "WWER-1000 Reactor Simulator Material for Traning Courses and Workshops", (2005) Traning course Series, No. 21 , 2th Edition, IAEA, VIENNA,.
- [۱۲] Cheng Liu, Fuyu Zhao, Ping Hu, (2010) "P controller with partial feed forward compensation and decoupling control for the steam generator water level". Nuclear Engineering and Design. (240), 181-190.

- [١٣] Ke Hu, Jinqi Yuan. (2008) "Multi-model predictive control method for nuclear steam generator water level". *Energy Conversion and Management*. (49), 1167-1174.
- [١٤] G.R. Ansarifar, H. Davilu, H.A. Talebi (2011) "Gain scheduled dynamic sliding mode control for nuclear steam generator " *Progress in Nuclear Energy* 53 – 651- 663.
- [١٥] S. Savolainen and J. Miettinen,(1991) "Practical modeling of horizontal steam generators with SMABRE and RELAP5 codes", in *Proceedings of International Seminar of Horizontal Steam Generators*, Vol. II, pp. 204-222, Lappeenranta, Finland, 11-14 March.
- [١٦]I. Karppinen,(1991). "Modeling of Horizontal Steam Generators with RELAP5/MOD2 and MOD3", in *Proceedings of International Seminar of Horizontal Steam Generators*, Vol. II,pp. 182-194, Lappeenranta, Finland, 11-14 March,
- [١٧] W. H. Strohmayer,(1982) " Dynamic Modeling of vertical U - tube steam generator for operational safety system ", ph.D. dissertation ,MIT, Cambridge ,MA , USA.
- [١٨] J. Miettinen and R. Kyrki-Rajamäki,(1991). "Role of Steam Generator Modeling in Operational Transients and ATWS", in *Proceedings of International Seminar of Horizontal Steam Generators*, Vol. II, pp. 234-257, Lappeenranta, Finland, 11-14 March,
- [١٩] NEA Nuclear Science Committee, NEA Committee on Safety of Nuclear Installations, (2002). "VVER-1000 coolant Transients Benchmark (V1000-CT)," Volume I:Final Specifications, US Department of Energy, OECD Nuclear Energy Agency, April.
- [٢٠] E. Irving, C. Miossec, and J. Tassart, (1979). "Toward Efficient Full Automatic Operation of the PWR Steam Generator with Water Level Adaptive Control", in *proceeding of Second International Conference on Boiler Dynamics and control in Nuclear Power Station*, PP. 309-329 , British Nuclear Energy Society (BNES), Bournemouth, U.K.
- [٢١] Adam, E.J. and Marchetti, J.L.(1999). "Dynamic simulation of large boilers with natural recirculation", *Computers and Chemical Engineering* , Vol.23,1031-1040.
- [٢٢] Astrom, K. J., & Eklund, K, (1972) "A simplified nonlinear model for a drum boiler -Turbine unit". *International Journal of Control*, 1972, Vol. 16, 145-169.
- [٢٣] Astrom, K. J., & Eklund, K.,(1975) "A simple non-linear drum-boiler model". *International Journal of Control*, Vol. 22, 739-740.
- [٢٤] Bell, R. D. & Astrom, K. J.,(1996), "A fourth order nonlinear model for drum-boiler dynamics" In *IFAC '96, Preprints 13th World Congress of IFAC*, vol. O, San Francisco, CA, 31-36.

[۲۵] Flynn, M. E. and O' Malley, M. J., "A **Drum Boiler Model for Long Term Power System Dynamic**."

[۲۶] De Mello, F. P,(1991) "**Boiler Model for System Dynamics Performance Studies**", IEEE Transaction on Power System, Vol. 6, No. 1, 66-77.

[۲۷] Astrom, K. J., and Bell, R. D,(2000), "**Drum-Boiler Dynamics**", Automatica, vol. 36, 363-378.

[۲۸] Zuber, N., and Findlay, J.A.,(1965) "Average volumetric concentration in two-phase flow systems", Journal of Heat Transfer, Vol.87, 453-468.

[۲۹] "**Control Valve Handbook**",(2005).4nd edition, Fisher Controls International.

[۳۰] Bulletin: "**Steam Throttle Valve for Steam Turbines**", BAFCO, Inc. P.O. Box 2428, 717 Mearns Road, Warminster, PA 189,74 USA.

[۳۱] ون وایلن، گوردون جان،(۱۳۸۴) "**مبانی ترمودینامیک**" ، ویرایش ششم، نشرنما، مشهد،

[۳۲] الوندی م، فدایی ع (۱۳۸۹)، "مدل سازی و طراحی سیستم کنترل برای یک مولد بخار استوانه-دار". **مجله کنترل** ، جلد ۴ ، شماره ۲، دوره ص ۶۶-۷۹

[۳۳] H. W. Fung, Q. G. Wang and T. H. Lee, (1998) “ PI Tuning in Terms of Gain and phase Margins”, Automatica, vol. 34, No. 9, PP. 1145-1149.

[۳۴] K. J. Astrom and T. Hagglund, (1995)“ Automatic Tuning of PID Controller”, 2th Edition, Instrument Society of America ,NC, USA.

[۳۵] M. G. Na H. C. No, (1993) “Quantitative Evaluation of Swelling or Shrinking Level Contributions in Steam Generators using Spectrum Analysis,” Annals of Nuclear Energy, vol. 20, No. 10, PP. 659-666.

[۳۶] L. A. Zadeh, (1965) “**Fuzzy Sets**”, Information and Control, no. 8, pp. 338-353,

[۳۷] H. J. Zimmerman, (1996)“**Fuzzy Set Theory and its Applications**”, Kluwer Academic Publishers.

[۳۸] L. X. Wang,(1997) “**A Course in Fuzzy Systems and Control**”, Prentice-Hall.

[۳۹] H. T. Nguyen, N. R. Prasad, C. L. Walker(2002), **A First Course in Fuzzy and Neural Control**, CRC press.

[۴۰] اسفیدانی ح، (۱۳۸۹)، پایان نامه ارشد، " کنترل فازی ربات اسکارا با مدولاسیون پهنای پالس"، دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Abstract

Steam generator is a major power plant component. The heat produced by the fission reaction is swept away by the reactor coolant which is circulated through the primary circuit into the steam generator, it delivers its energy through the U-tube pipes to the water in the steam generator and produces steam. The problem has been of great concern for many years as the steam generator is a highly nonlinear and complex system, showing inverse response dynamics especially at low operating power levels. the inverse thermal hydraulic behavior (non-minimum phase characteristic) due to swell and shrink effects especially at low operating power levels. If the steam generator level goes too low, there is not adequate water in the steam generator to be converted to steam, and remove the heat. If the steam generator level goes too high, there is a potential of water droplet carry-over to the turbine, which could damage the turbine blades. Therefore, the level of the steam generator need to be maintained between the required limits.

In this thesis, is to design, analyze a water level controller for U-tube steam generators using PI, fuzzy controller. To attain a good performance in all powers, Computer simulations show that the proposed controller improves transient response of steam generator water level through the entire range of operation and demonstrate its superiority to existing controllers.

Keywords: nuclear power plant; steam generator; water level control; fuzzy and classic controllers.



Shahrood University of Technology

Department of Electrical and Robotic Engineering

M.Sc.thesis

**Water Level Control in the Steam Generator a Nuclear Power Plant With
Fuzzy Method**

A.Hosseini

Supervisors

Dr.M.haddadzarif

Dr.M.Fateh

February 2012