

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
گروه مهندسی برق - قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

بهینه سازی کنترل کننده ولتاژ و فرکانس در سیستم چند
ماشینه با استفاده از بهینه سازی چند هدفه تئوری بازی

حسین یاسمی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر محمد رضا رفیعی

تیرماه ۱۳۸۸

بِسْمِہِ تَعَالٰی

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای رشته گرایش صورت گرفت.

پهمنه ساری کنتل و فرکانسی در سیستم چند ماشین به استفاده از پهمنه سازی چند هدفه تئوری بازی

عنوان

که در تاریخ ۱۳۸۸/۰۴/۰۹

با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

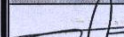
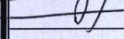
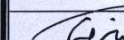
قبول (با درجه : عالی امتیاز : ۱۹,۵) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۲۔ بسیار خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۱- عالی (۲۰ - ۱۸)

۴۔ قابل قبول (۱۳/۹۹ - ۱۲)

۳- خوب (۱۵/۹۹ - ۱۴)

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	احمد دارابی	استاد	
۲- استاد مشاور			
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	اسد رضا سرور	استاد	
۴- استاد محقق	ناصر بزرگ	دانشیار	
۵- استاد محقق	سید باقر داد	استاد	

تأیید رئیس دانشکده :

با تشکر از:

پدر و مادرم عزیزم

و

اساتید گرانقدر دکتر دارابی و دکتر رفیعی

چکیده فارسی

پایدارساز سیستم قدرت، PSS نقش اساسی در سیستم های قدرت دارد. بنابر این طراحی دقیق آن از اهمیت زیادی برخوردار است و مقالات بسیاری در این رابطه نوشته شده است. روش های طراحی کلاسیک PSS مبتنی بر خطی سازی سیستم قدرت و استفاده از تئوری جبران فاز می باشد که امری وقت گیر و غیر دقیق است. در سال های اخیر روش های دیگری در این مساله به کار گرفته شده اند که مبتنی بر بهینه سازی های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک هستند. این روش ها یا تنها یک تابع هدف را برای بهینه سازی در نظر می گیرند و یا مجموع وزن دهی شده توابع هدف را بهینه می نمایند که هر یک مشکلات خاص خود را دارند. در این پایان نامه از بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر تئوری بازی به عنوان یک روش جدید و سریع برای طراحی PSS استفاده گردیده است. در روش اول زمان استقرار و تغییرات دامنه سرعت و یا زاویه روتور حین خطا به عنوان دو پارامتر مهم جهت ارزیابی عملکرد PSS به کار گرفته شده اند و مینیمم سازی آن ها به عنوان دو تابع هدف در نظر گرفته شده است. و در روش دوم که بهتر و کامل تر از اولی است ماکزیمم کردن مینیمم نسبت میرایی و مینیمم میرایی توابع هدف هستند. پارامترهای PSS متغیرهای طراحی اند. الگوریتم های SPEA و NSGA دو روشی هستند که مرتبط با تئوری بازی های مشارکتی می باشند و مجموعه ای از جواب های بهینه را تولید می کنند که مجموعه بهینه پرتو نامیده می شوند. این یک فرصت مناسب را برای طراح و کاربر PSS فراهم می کند که با توجه به نیازهای طراحی مورد علاقه اش را انتخاب نماید. روش دیگر Nash GA است که تنها یک جواب تولید می کند و مبتنی بر تئوری بازی رقابتی است. روش های پیشنهادی روی دو سیستم آشنا پیاده سازی و آزمایش شده اند: سیستم دو ناحیه ای چهار ماشینه کندور و سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت. پایدار ساز چند بانده IEEE معروف به PSS4B و پایدارساز دلتا-امگا جهت طراحی به کار گرفته شده اند. در نهایت خطاهای

مختلفی روی سیستم های مذکور با PSSهای بهینه اعمال شده و نتایج شبیه سازی با روش های دیگر طراحی مقایسه شده اند که جالب است.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

[۱] یاسمی ح، رفیعی م.ر، دارابی ا و کردی ح، (۱۳۸۷) "طراحی بهینه پایدارساز سیستم قدرت با استفاده از بهینه سازی چند هدفه تئوری بازی"، بیست و سومین کنفرانس بین المللی برق PSC 2008.

[2] H. Yassami, A. Darabi, S.M.R Rafiei, "Multi-objective optimal design of PSS using NSGA," TPE-2009 Spain, Bilbao, Sep. 2009.

فهرست مطالب

صفحه

فصل اول : مقدمه	۱
فصل دوم : مفاهیم مربوط به پایداری سیستم های قدرت	۵
۱-۲) تعاریف مربوط به پایداری و طبقه بندی ها	۶
۱-۱-۲) تعریف پایداری	۶
۲-۱-۲) طبقه بندی پایداری سیستم قدرت	۶
۲-۲) نوسانات الکترومکانیکی	۱۱
۱-۲-۲) طبقه بندی نوسانات الکترومکانیکی	۱۱
۲-۲-۲) نقش نوسانات در فروپاشی های شبکه	۱۴
۳-۲) بررسی عملکرد ژنراتور سنکرون در اغتشاشات	۱۵
۱-۳-۲) معادله نوسان	۱۵
۲-۳-۲) عملکرد ژنراتور سنکرون در اغتشاش شدید (پایداری گذرا)	۱۷
فصل سوم : مقدمه ای بر کنترل خطی در سیستم های قدرت	۲۶
فصل چهارم : بررسی روش کلاسیک طراحی پایدارساز سیستم قدرت	۳۱
۱-۴) مقدمه	۳۲
۲-۴) گشتاورهای میرا کننده و سنکرون کننده	۳۵
۱-۲-۴) تحلیل گشتاورهای میرا کننده و سنکرون کننده در حوزه فرکانس	۳۹
۳-۴) طراحی کلاسیک پایدارساز سیستم قدرت	۳۹
فصل پنجم: معرفی سیستم تحت مطالعه و اجزای آن	۴۵
۱-۵) مقدمه	۴۶
۲-۵) سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت	۴۶
۱-۲-۵) واحد تولیدی	۴۷
۲-۲-۵) ترانسفورماتور قدرت	۵۱
۳-۲-۵) خط انتقال و بارها	۵۱
۳-۵) سیستم ۴ ماشین ۲ ناحیه ای کندور	۵۱
۱-۳-۵) واحد تولیدی	۵۲

۵۴	 (۲-۳-۵) ترانسفورماتور قدرت، خط انتقال و بار
۵۴	 (۴-۵) پایدار ساز سیستم قدرت
۵۸	فصل ششم: مقدمه ای بر تئوری بازی و کاربرد آن در بهینه سازی
۵۹	 (۱-۶) مقدمه
۵۹	 (۱-۱-۶) تئوری بازی چیست؟
۵۹	 (۲-۱-۶) تاریخچه و تأثیر تئوری بازی
۶۰	 (۳-۱-۶) انواع بازی ها
۶۱	 (۲-۶) واژه نامه
۶۴	 (۳-۶) تعاریف و مثال ها
۶۵	 (۱-۳-۶) فرم های استراتژیک و گسترده
۶۶	 (۲-۳-۶) چیرگی
۷۰	 Nash تعادل (۳-۳-۶)
۷۲	 (۴-۳-۶) انتخاب تعادل
۷۳	 (۵-۳-۶) بازی های تکاملی
۷۵	 (۶-۳-۶) مثال ها و مفاهیم متفرقه
۸۰	 (۴-۶) بهینه سازی با استفاده از مفاهیم تئوری بازی
۸۰	 (۱-۴-۶) بازی های مشارکتی : Pareto front
۸۰	 SPEA (۱-۱-۴-۶)
۸۴	 NSGA-II (۲-۱-۴-۶)
۸۷	 Nash تعادلی: رقابتی (۲-۴-۶)
۸۷	 Nash GA (۱-۲-۴-۶)
۹۲	فصل هفتم: بررسی نتایج شبیه سازی
۹۳	 (۱-۷) بهینه سازی در حوزه زمان
۹۳	 (۱-۱-۷) طراحی PSS برای SMIB
۹۳	 (۱-۱-۱-۷) طراحی PSS دلتا-امگا توسط روش SPEA و مقایسه آن با روش کلاسیک
۹۵	 (۲-۱-۱-۷) طراحی PSS4B توسط روش SPEA و مقایسه آن با CPSS
۹۶	 (۳-۱-۱-۷) مقایسه نتایج و بررسی عملکرد پایدارسازها در شرایط خطا
۱۰۱	 (۲-۱-۷) طراحی PSS برای سیستم ۲ ناحیه ای ۴ ماشینه
۱۰۷	 (۲-۷) بهینه سازی در حوزه فرکانس
۱۰۹	 (۱-۲-۷) طراحی PSS برای SMIB

۱۱۱	 ۲-۲-۷ طراحی PSS برای سیستم ۲ ناحیه ای ۴ ماشینه
۱۱۶	 فصل هشتم: جمع بندی و پیشنهادات
۱۱۷	 ۱-۸ جمع بندی
۱۱۷	 ۲-۸ پیشنهادات

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) طبقه بندی پایداری سیستم قدرت ۷
- شکل (۲-۲) نمونه ای از نوسان محلی یک ژنراتور ۱۲
- شکل (۳-۲) نمونه ای از نوسانات بین ناحیه ای ۱۳
- شکل (۴-۲) نمونه ای از نوسان یک مد پیچشی ۱۴
- شکل (۵-۲) مدل ماشین سنکرون جهت مطالعه پایداری گذرا ۱۸
- شکل (۶-۲) منحنی تغییرات توان الکتریکی ژنراتور برحسب زاویه قدرت ۲۰
- شکل (۷-۲) اتصال کوتاه سه فاز به زمین در پایانه ژنراتور ۲۱
- شکل (۸-۲) منحنی توان زاویه ژنراتور سیستم SMIB در اثر وقوع خطای سه فاز به زمین در پایانه ژنراتور ۲۱
- شکل (۹-۲) منحنی تغییرات زاویه قدرت سیستم شکل ۷ در طول زمان ۲۲
- شکل (۱۰-۲) اتصال کوتاه سه فاز به زمین در فاصله دور از پایانه ژنراتور ۲۲
- شکل (۱۱-۲) منحنی توان زاویه ژنراتور سیستم SMIB در اثر وقوع خطای سه فاز به زمین فاصله دور از پایانه ژنراتور ۲۳
- شکل (۱-۳) سیستم SMIB مربوط به کتاب کندور ۲۹
- شکل (۱-۴) بلوک دیاگرام معادله نوسان ۳۳
- شکل (۲-۴) محل قرار گیری قطب های سیستم درجه ۲ در صفحه مختلط در حالت $0 < \xi < 1$ ۳۴
- شکل (۳-۴) پاسخ پله سیستم درجه ۲ در حالت $0 < \xi < 1$ ۳۴
- شکل (۴-۴) دیاگرام مکان هندسی ریشه ها وقتی D تغییر می کند ۳۶
- شکل (۵-۴) ترسیم شکل ۱ به صورت متفاوت ۳۷
- شکل (۶-۴) دیاگرام مکان هندسی ریشه ها وقتی که k_1 تغییر می کند ۳۸
- شکل (۷-۴) تقسیم گشتاور اعمالی به دو مولفه سنکرون کننده و میرا کننده در حوزه فرکانس ۳۹
- شکل (۸-۴) محل قرار گیری PSS در مدل هفرون فیلیپس ۴۱
- شکل (۹-۴) ساختار PSS کلاسیک با یک جبران ساز پیش فاز- پس فاز ۴۱
- شکل (۱۰-۴) دیاگرام بد یک جبران ساز پیش فاز ۴۳
- شکل (۱-۵) دیاگرام تک خطی SMIB ۴۶
- شکل (۲-۵) بلوک دیاگرام واحد تولیدی ۴۷
- شکل (۳-۵) ارتباط بین بخش های الکتریکی و مکانیکی در مدل ماشین سنکرون ۴۸
- شکل (۴-۵) مدل توربین هیدرولیک و گاورنر ۴۹

۵۰	شکل (۵-۵) بلوک دیاگرام کلی سیستم تحریک جریان مستقیم
۵۱	شکل (۶-۵) مدل سیستم تحریک
۵۲	شکل (۷-۵) دیاگرام تک خطی سیستم دو ناحیه ای کندور
۵۳	شکل (۸-۵) گاورنر و توربین بخار
۵۵	شکل (۹-۵) پایدار ساز سیستم قدرت
۵۶	شکل (۱۰-۵) بلوک دیاگرام PSS4B
۵۷	شکل (۱۱-۵) بلوک دیاگرام تراگردان PSS4B
۵۷	شکل (۱۲-۵) شکل ساده شده PSS4B
۶۷	شکل (۱-۶) ماتریس امتیازات بازی معمای زندانی
۶۷	شکل (۲-۶) ماتریس امتیازات با نمایش تقارن
۶۹	شکل (۳-۶) ماتریس امتیازات بازی انتخاب کیفیت
۷۱	شکل (۴-۶) بازی انتخاب کیفیت با تبصره فسخ قرارداد برای مشتری
۷۴	شکل (۵-۶) بازی انتخاب پهنای باند
۸۱	شکل (۶-۶) فلوچارت روش SPEA
۸۳	شکل (۷-۶) مکانیزم اختصاص برازندگی
۸۵	شکل (۸-۶) non-domination sorting
۸۶	شکل (۹-۶) روش crowding distance sorting
۸۷	شکل (۱۰-۶) الگوریتم NSGA-II
۸۹	شکل (۱۱-۶) الگوریتم Nash GA
۹۱	شکل (۱۲-۶) مقایسه الگوریتم های بهینه سازی
۹۵	شکل (۱-۷) Pareto-front مربوط به پایدار ساز دلتا- امگا در مقایسه با طراحی کلاسیک
۹۶	شکل (۲-۷) Pareto-front مربوط به PSS4B در مقایسه با طراحی کلاسیک
۹۸	شکل (۳-۷) اعمال خطای سیگنال کوچک به سیستم SMIB
۹۹	شکل (۴-۷) اعمال اتصال کوتاه تک فاز به زمین در سیستم
۱۰۰	شکل (۵-۷) اعمال اتصال کوتاه سه فاز به زمین در سیستم SMIB
۱۰۲	شکل (۶-۷) طراحی های بهینه به دست آمده توسط روش های مرتبط با تئوری بازی برای PSS4B
۱۰۴	شکل (۷-۷) اعمال خطای سیگنال کوچک به سیستم TAFM
۱۰۵	شکل (۸-۷) اعمال خطای LD ₁ به سیستم TAFM
۱۰۶	شکل (۹-۷) اعمال خطای LD ₂ به سیستم TAFM

- شکل (۷-۱۰) اعمال خطای LD_3 به سیستم TAFM ۱۰۷
- شکل (۷-۱۱) نمایش مفهومی توابع هدف در صفحه مختلط ۱۰۸
- شکل (۷-۱۲) Pareto-front سیستم SMIB در مقایسه با طراحی کلاسیک ۱۱۰
- شکل (۷-۱۳) قطب های نوسانی غالب سیستم تک ماشینه با PSS های منتخب ۱۱۱
- شکل (۷-۱۴) Pareto-front سیستم TAFM در مقایسه با روش وزن دهی توابع هدف ۱۱۲
- شکل (۷-۱۵) قطب های نوسانی غالب سیستم TAFM با پایدارساز MOGA ۱۱۳
- شکل (۷-۱۶) قطب های نوسانی غالب سیستم TAFM با پایدارسازهای منتخب ۱۱۳
- شکل (۷-۱۷) اعمال خطای سه فاز به سیستم ۱۱۴
- شکل (۷-۱۸) اعمال خطای سه فاز به سیستم TAFM ۱۱۵

فهرست جداول

جدول (۷-۱) پارامترهای الگوریتم ژنتیک مرتبط با SPEA	۹۴
جدول (۷-۲) حدود پارامترهای طراحی PSS دلتا- امگا	۹۴
جدول (۷-۳) محدوده پارامترهای طراحی PSS4B	۹۵
جدول (۷-۴) مشخصات PSS دلتا- امگای انتخابی برای SMIB	۹۷
جدول (۷-۵) مشخصات PSS4B انتخابی برای SMIB	۹۷
جدول (۷-۶) لیست خطاهای اعمال شده به سیستم SMIB جهت ارزیابی PSS	۹۷
جدول (۷-۷) پارامترهای الگوریتم ژنتیک مرتبط با الگوریتم های طراحی	۱۰۱
شکل (۷-۸) مشخصات PSS4B انتخابی برای TAFM	۱۰۳
جدول (۷-۹) لیست خطاهای اعمال شده به سیستم TAFM جهت ارزیابی PSS	۱۰۳
جدول (۷-۱۰) مشخصات PSS های انتخاب شده و CPSS	۱۱۰
جدول (۷-۱۱) مشخصات PSS های انتخاب شده و MOGA	۱۱۲
جدول (۷-۱۲) فرکانس و نسبت میرایی مدهای الکترومکانیکی TAFM در حالت های مختلف ..	۱۱۴
جدول (۷-۱۳) لیست خطاهای اعمال شده به سیستم ها جهت ارزیابی PSS دلتا- امگا	۱۱۴

فصل اول

مقدمه

در دهه های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ تاکید زیادی روی طراحی اقتصادی ژنراتورها، به خصوص ژنراتورهای با توان بالا وجود داشت. این امر منجر به ساخت ماشین هایی با رآکتانس حالت ماندگار بالا گردید که این خود باعث تضعیف مشخصه بار-ولتاژ شد، علی الخصوص زمانی که ژنراتور به خطوط انتقال بلند وصل می شد. در حالت بارداری عکس العمل آرمیچر منجر به کاهش شار میدان تحریک و در نتیجه افت گشتاور سنکرون کنندگی می شد. بنابراین مسائل مرتبط با پایداری گذرای ماشین سنکرون اهمیت ویژه ای پیدا کرد. این مساله با استفاده از سیستم های کنترل تحریک با بهره بالا و سریع حل گردید. سیستم تحریک کنترل شده با ترستور استاتیک به طور فزاینده ای استفاده شد، تا جایی که گشتاور سنکرون کننده کافی ایجاد کند و عکس العمل آرمیچر را در تضعیف این گشتاور خنثی نماید. ولی سیستم های تحریک مشکل دیگری به وجود آوردند و آن تولید گشتاور میرا کننده منفی در توان های بالا و شبکه های ضعیف بود. این گشتاور منفی مساله ناپایداری نوسانی را افزایش داد. این مشکل با استفاده حلقه کنترلی حل شد که به ولتاژ مرجع رگولاتور یک سیگنال می افزود و با این کار میرایی مثبت تولید می کرد. از این فیدبک کنترلی به نام PSS¹ یاد شد.

هدف اولیه PSS معرفی یک گشتاور الکتریکی در ژنراتور سنکرون است که متناسب با اختلاف سرعت واقعی با سرعت سنکرون ماشین است. وقتی که روتور نوسان می کند این گشتاور به عنوان یک گشتاور میرا کننده جهت از بین بردن نوسانات عمل می نماید. در حقیقت PSS یک سیگنال اضافی برای سیستم تحریک فراهم می نماید که هم فاز با انحراف سرعت مکانیکی روتور است و باعث افزایش پایداری ژنراتور و در نتیجه کل سیستم می شود [۱].

در دو دهه اخیر انواع مختلفی از PSSها طراحی شده اند [۲]-[۵]. ساده ترین نوع پایدارساز دلتا-امگا است که متشکل از یک جبران کننده ثابت، بهره و یک محدود کننده می باشد. طراحی PSS به روش کلاسیک براساس مبانی تئوری جبران فاز در حوزه فرکانس است. پارامترهای این PSS در طول

عملکرد ثابتند. با توجه به فرضیات انجام شده در کنترل خطی طراحی این پایدارساز چندان دقیق نیست. در سال ۲۰۰۰ یک PSS با ساختار جدید معرفی شد [۶] و بعدها از آن تحت عنوان PSS4B یاد شد [۷]. این PSS بسیاری از عیوب انواع قبلی را رفع می نمود.

در این پروژه با طراحی PSS به عنوان یک بهینه سازی دو هدفه برخورد شده است، در حالی که پارامترهای آن متغیرهای طراحی اند. دو الگوریتم تکاملی SPEA [۸] و NSGA-II [۹] که توسط تئوری بازی مشارکتی^۲ قابل تفسیرند جهت حل مساله به کار گرفته شده اند. در این الگوریتم ها جواب یک به دست نمی آید. بلکه مجموعه ای از جواب ها که شمار اعضایشان محدود هستند به دست می آیند و از آن ها تحت عنوان مجموعه بهینه پرتو^۳ یاد می شود. هرکدام از اعضای این مجموعه با توجه به نیاز طراح یا مشتری می توانند انتخاب گردیده و استفاده شوند. الگوریتم بهینه سازی چند هدفه دیگر که بر مبنای تئوری بازی رقابتی است، Nash GA [۱۰] می باشد. این روش بر خلاف دو الگوریتم قبلی یک جواب به دست می دهد که از آن تحت عنوان تعادل Nash یاد می شود. تئوری بازی در اوایل دهه ۵۰ توسط J. F. Nash فرموله شد و اولین کاربردهایش در اقتصاد هویدا گشت. این تئوری به طور ویژه در حل مسائلی به کار گرفته شد که فضای رقابتی داشتند. تئوری بازی می تواند با الگوریتم هایی مانند الگوریتم های تکاملی ترکیب گشته و به مسائل صنعتی اعمال شود. استفاده از این تئوری به جای روش های سنتی می تواند باعث صرفه جویی در وقت گردد. چیزی که در دنیای کنونی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

ساختار پایان نامه به این صورت است که در فصل دوم ابتدا تعاریف و طبقه بندی های مربوط به پایداری بحث می شود. سپس نوسانات الکتروژمکانیکی و در نهایت عملکرد ژنراتور سنکرون در اغتشاشات بررسی می گردند. فصل سوم به دلیل استفاده در طراحی و مکان یابی PSS، مقدماتی را از کنترل خطی در سیستم های قدرت ارائه می کند. فصل چهارم به بررسی روش طراحی کلاسیک

2- Cooperative

3 - Pareto Optimal Set (POS)

PSS و مفاهیم مرتبط با آن می پردازد. طراحی PSS باید روی سیستم قدرت پیاده سازی و بررسی گردد. سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت و سیستم ۲ ناحیه ای ۴ ماشینه کندور سیستم هایی هستند که برای آزمایش طراحی PSS توسط تئوری بازی به کار گرفته شده اند. مشخصات این دو سیستم به همراه دو PSS دلتا- امگا و PSS4B در فصل پنجم آورده شده است. فصل ششم مفاهیمی از تئوری بازی ها را که مورد نیاز این پروژه می باشد در بر دارد. تئوری بازی بحث بسیار گسترده ای است که تمام جنبه های آن را نمی توان در یک مبحث کوتاه گنجاند. در فصل هفتم به بررسی نتایج طراحی PSS برای سیستم های ذکر شده می پردازد و در نهایت فصل هشتم شامل جمع بندی و پیشنهادات می باشد.

فصل دوم

مفاهیم مربوط به پایداری سیستم های قدرت

۲-۱) تعاریف مربوط به پایداری و طبقه بندی ها

۲-۱-۱) تعریف پایداری

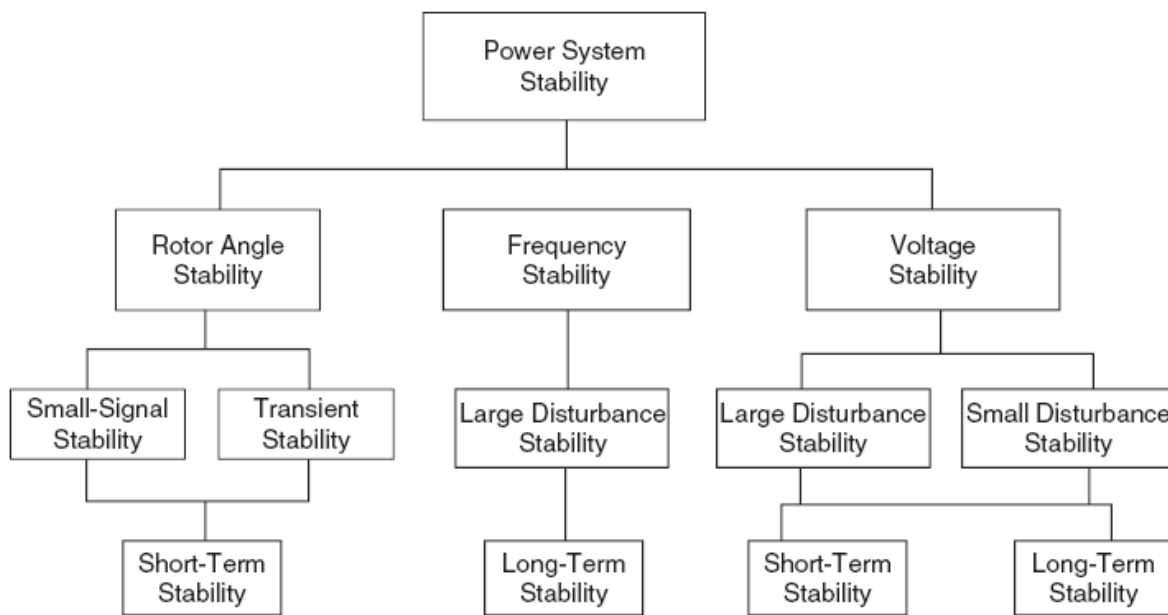
پایداری سیستم قدرت عبارت است از توانایی سیستم در رسیدن به یک نقطه تعادل در مواجهه با یک خطای فیزیکی، وقتی که اکثر متغیرها دارای قید هستند، به طوری که یکپارچگی سیستم حفظ گردد.

سیستم قدرت یک سیستم با ویژگی غیرخطی بالاست که دائماً در معرض تغییر است. بارها، خروجی ژنراتور، توپولوژی و پارامترهای کلیدی مدام تغییر می کنند. وقتی که یک سیستم در معرض یک خطای گذرا قرار می گیرد، پایداری سیستم بستگی به طبیعت خطا و شرایط کاری اولیه سیستم دارد. خطا ممکن است کوچک یا بزرگ باشد. خطاهای کوچک در شکل تغییرات بار به طور پیوسته اتفاق می افتند و سیستم جهت تغییر شرایط تنظیم می شود. سیستم باید توانایی عملکرد رضایت بخش تحت این شرایط را داشته باشد و در ضمن از عهده تأمین بار نیز بر آید. همچنین باید بتواند در مقابل خطاهای متعدد شدید مانند اتصال کوتاه روی خطوط یا از مدار خارج شدن ژنراتورها دوام بیاورد [۱۱].

۲-۱-۲) طبقه بندی پایداری سیستم قدرت

ناپایداری سیستم قدرت می تواند فرم های مختلفی به خود بگیرد و از رنج وسیعی از فاکتورها تأثیر بپذیرد. طبقه بندی پایداری به انواع مختلف به تحلیل و فهم بیشتر آن کمک شایانی می کند. بدین منظور در این قسمت طبقه بندی پایداری آورده شده است.

شکل ۲-۱ طبقه بندی پایداری سیستم قدرت به گروه ها و زیر گروه های گوناگون را نشان می دهد. شرح این طبقه بندی در ادامه می آید.



شکل (۱-۲) طبقه بندی پایداری سیستم قدرت [۱۱]

الف) پایداری زاویه روتور

پایداری زاویه روتور توانایی ژنراتورهای سنکرون به هم پیوسته سیستم قدرت در حفظ پایداری تحت شرایط عملکرد نرمال و بعد از بروز خطا می باشد. این امر بستگی به توانایی حفظ / بازیابی تعادل بین گشتاور الکترومکانیکی و مکانیکی هر ژنراتور دارد. ناپایداری ممکن است در شکل افزایش زاویه روتور برخی از ژنراتورهای سنکرون ظاهر شده و موجب از دست رفتن سنکرونیزم آن ها گردد. مساله پایداری زاویه روتور شامل مطالعه نوسانات الکترومکانیکی سیستم قدرت است. یک فاکتور اساسی در این مساله نحوه تغییر توان های خروجی ماشین های سنکرون در قبال تغییر زاویه روتورشان می باشد.

در حالت ماندگار^۱ یک تعادل بین گشتاور مکانیکی ورودی و گشتاور الکتریکی خروجی هر ماشین وجود دارد و در این حالت سرعت ثابت است. اگر به این سیستم یک اغتشاش اعمال گردد تعادل به هم می خورد و باعث اعمال شتاب مثبت یا منفی به روتور ماشین ها می گردد. اگر یک ژنراتور موقتاً

1- Steady state

سریع تر از دیگری کار کند، زاویه روتور آن نسبت به ژنراتور با سرعت آهسته تر پیش می افتد و این بسته به میزان اختلاف زوایای دو ماشین باعث انتقال بخشی از بار ژنراتور کند به ژنراتور سریع تر می شود. این امر می تواند موجب کاهش اختلاف سرعت و اختلاف زاویه ها شود. رابطه زاویه-توان همانطور که در بالا بحث شد بسیار غیر خطی است. پس از یک حد معین، افزایش اختلاف زوایا باعث کاهش توان انتقالی می شود. این به نوبه خود باعث افزایش بیشتر تفاوت زاویه ها می شود و در نهایت موجب ناپایداری می گردد. قابل ذکر است که پدیده خروج از سنکرونیزم^۲ می تواند بین یک ماشین و بقیه سیستم یا بین گروهی از ماشین ها اتفاق بیفتد. در حالی که در داخل یک گروه ممکن است سنکرونیزم هنوز برقرار باشد.

پدیده تغییر در گشتاور الکتریکی ماشین سنکرون پس از یک اغتشاش می تواند به دو جزء تجزیه شود:

- گشتاور سنکرون کننده که همفاز با تغییرات زاویه روتور است

- گشتاور میرا کننده که همفاز با تغییرات انحراف سرعت روتور است

پایداری سیستم وابسته به وجود هر دو گشتاور فوق می باشد. فقدان گشتاور سنکرون کننده کافی باعث ناپایداری غیر تناوبی یا غیر نوسانی می شود. در حالی که فقدان گشتاور میرا کننده باعث ناپایداری نوسانی می شود.

پایداری زاویه روتور به دو بخش قابل تقسیم است:

- پایداری سیگنال کوچک، که عبارت است از توانایی سیستم قدرت در حفظ سنکرونیزم تحت اغتشاشات کوچک. فرض بر این است که اغتشاشات به قدری کوچکند که اجازه خطی سازی معادلات سیستم را به ما بدهند. این اغتشاشات کوچک متناوباً در سیستم های قدرت رخ می دهند. تغییرات کوچک در بار از این نوعند. پایداری سیگنال کوچک بستگی به نقطه کار اولیه سیستم دارد. ناپایداری

می تواند در دو فرم ظاهر شود: افزایش زاویه روتور به صورت غیر نوسانی به دلیل کمبود گشتاور سنکرون کننده و نوسانات زاویه روتور همراه با افزایش دامنه به دلیل کمبود گشتاور میرا کننده. در سیستم های عملی امروزی مساله پایداری سیگنال کوچک بیشتر با کمبود میرایی نوسانات مواجه است. ۱۰ تا ۲۰ ثانیه زمان مورد علاقه ما جهت بررسی پایداری سیگنال کوچک است. در حالت سیگنال کوچک ۴ مد محلی، بین ناحیه ای، کنترلی و بین نیروگاهی بررسی می گردد.

- پایداری زاویه روتور سیگنال بزرگ یا پایداری گذرا، همانطور که از نامش نیز پیداست، عبارت است از توانایی سیستم قدرت در حفظ سنکرونیزم وقتی که در معرض یک اغتشاش بزرگ قرار می گیرد. پایداری گذرا بستگی به نقطه کار اولیه سیستم و همچنین شدت اغتشاش دارد. معمولاً اغتشاش سیستم را به گونه ای تغییر می دهد که در حالت ماندگار نقطه کاری متفاوت با حالت اولیه دارد.

ناپایداری در فرم تغییرات غیر نوسانی و به دلیلی کمبود گشتاور سنکرون کننده کافی می باشد و به عنوان first swing stability از آن یاد می شود. در سیستم های قدرت بزرگ ناپایداری ممکن است تنها با یک مد مرتبط نبوده، بلکه حاصل اجتماع چندین مد نوسانی باشد. محدوده زمانی بررسی پایداری گذرا معمولاً بین ۳ تا ۵ ثانیه است. این زمان در سیستم های قدرت بزرگ با مدهای بین ناحیه ای غالب ممکن است تا ۱۰ ثانیه نیز افزایش یابد.

این که بخواهیم سیستم قدرت در مقابل تمام اغتشاشات ممکن پایدار باشد امری غیر عملی و غیر اقتصادی است. در طراحی تنها اغتشاشاتی در نظر گرفته می شوند که به لحاظ عقلانی احتمال وقوع بیشتری دارند. همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، پایداری سیگنال کوچک و پایداری گذرا جزو پدیده های کوتاه مدت طبقه بندی می شوند.

ب) پایداری ولتاژ:

پایداری ولتاژ مربوط است به توانایی یک سیستم قدرت در حفظ ولتاژها در مقدار حالت ماندگار، در تمام شین ها وقتی که سیستم در حال کار عادی است و یا وقتی که تحت تاثیر یک اغتشاش بزرگ قرار می گیرد. ناپایداری که ممکن است به وجود آید در شکل افزایش یا کاهش مداوم ولتاژ خروجی برخی از شین ها ظاهر می شود. نتیجه محتمل ناپایداری ولتاژ از دست رفتن بار^۳ در مناطقی که ولتاژ به مقدار خیلی کم افت می کند و یا از دست رفتن یکپارچگی سیستم قدرت می باشد.

وقتی یک سیستم قدرت پس از یک اغتشاش شدید به سمت ناپایداری برود، تمایز دقیق بین ناپایداری زاویه بار و ناپایداری ولتاژ ممکن نیست. زیرا در یک سیستم ناپایدار تمام متغیرها تحت تاثیر قرار گرفته و از نقطه تعادل خود فاصله می گیرند. ولی بسته به این که کدام یک از دو متغیر اصلی از محدوده خود خارج شوند، می توان ناپایداری را به یکی از این دو نسبت داد. عامل اصلی ناپایداری ولتاژ ناتوانی سیستم در مقابل تقاضای بار راکتیو است. اگر به این تقاضا پاسخ داده نشود ولتاژ افت می کند. اگر این افت به حدی باشد که بعضی از رله ها عمل نمایند و برخی از واحدهای تولیدی خارج شوند، افت ولتاژ بیشتر می شود و این باعث خارج شدن تعدادی دیگر از واحدها می شود و این پدیده ادامه می یابد تا شبکه به چند جزیره تبدیل شود. این پدیده را فروپاشی ولتاژ می نامند. همانند ناپایداری زاویه روتور، ناپایداری ولتاژ نیز به دو نوع سیگنال بزرگ و سیگنال کوچک تقسیم می گردد.

ج) پایداری فرکانس:

پایداری فرکانس عبارت است از توانایی سیستم قدرت در حفظ فرکانس های حالت ماندگار در صورت وقوع اختلال شدید در سیستم، که به خاطر عدم تعادل شدید بین بار و تولید رخ می دهد [۱۱].

۲-۲) نوسانات الکترومکانیکی

نوسانات الکترومکانیکی با شروع به کار ژنراتورهای سنکرون به صورت موازی آشکار شدند. لختی مکانیکی و ویژگیهای زاویه توان منجر به نوسانات بین ۱ تا ۳ هرتز گردید و به عنوان "hunting" از آن ها یاد شد. نوسانات در سیستم های قدرت از روی اجزایی که نوسانات در آن ها اتفاق می افتد، طبقه بندی می شوند. همچنین در این بخش برخی از فروپاشی های ناشی از نوسانات در سیستم های قدرت شرح داده می شوند.

۲-۲-۱) طبقه بندی نوسانات الکترومکانیکی:

نوسانات الکترومکانیکی به انواع زیر تقسیم می شوند.

الف) نوسانات داخل نیروگاهی

ب) نوسانات مد محلی

ج) نوسانات مد بین ناحیه ای

د) نوسانات مد کنترلی

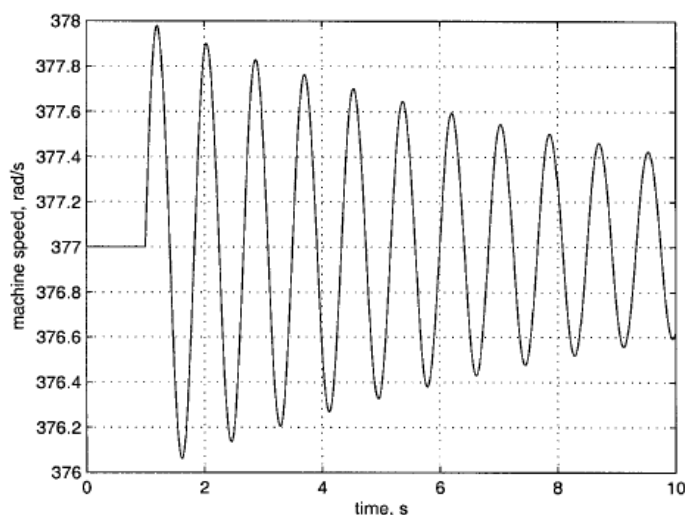
ه) نوسانات مدهای پیچشی

الف) نوسانات داخل نیروگاهی

ماشین های درون یک سایت نیروگاهی در فرکانس بین ۲ تا ۳ هرتز در مقابل یکدیگر نوسان می کنند. که این بستگی به توان واحدها و راکتانس متصل کننده بین آن ها دارد. به این نوسانات داخل نیروگاهی می گویند، چون نوسانات بین واحدهای درون یک مجتمع نیروگاهی اتفاق می افتد و بقیه سیستم تأثیری نمی پذیرد.

ب) نوسانات مد محلی

در مد محلی، یک ژنراتور در مقابل کل سیستم در فرکانس بین ۱ تا ۲ هرتز نوسان می کند. تغییر در سرعت یک ژنراتور که نمونه ای از یک نوسان مد محلی می باشد، در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل (۲-۲) نمونه ای از نوسان محلی یک ژنراتور [۱]

در این حالت بقیه سیستم توسط یک منبع ولتاژ با فرکانس ثابت فرض می شود که از این مدل تحت عنوان تک ماشین متصل به شین بی نهایت^۴ یاد می شود. میرایی و فرکانس نوسانات با خروجی ماشین و امپدانس بین ترمینال ماشین و شین بی نهایت تغییر می کند. این نوسانات می توانند توسط PSS و AVR که جهت جبران فاز و بهره به درستی تنظیم شده باشند، جبران شوند.

ج) نوسانات مد بین ناحیه ای

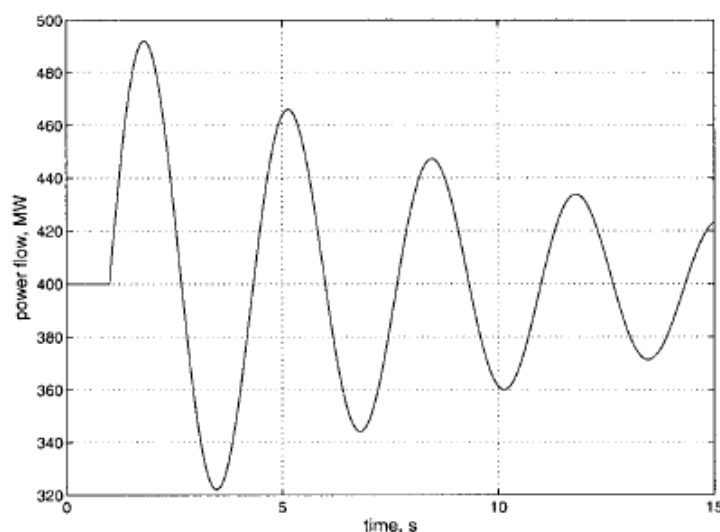
این پدیده در بخش بزرگی از شبکه مشاهده می شود و شامل ۲ گروه همبسته^۵ از ژنراتورهاست که در مقابل هم و در فرکانس کمتر یا مساوی ۱ هرتز نوسان می کنند. در این حالت نوسان بین خطوط

4- SMIB

5- Coherent

متصل کننده ۲ گروه می تواند بزرگ باشد. شکل ۲-۳ این امر را نشان می دهد. در این شکل فرکانس نوسانات در حدود ۰/۳ هرتز است.

این پدیده پیچیده شامل بسیاری از قسمت های سیستم می باشد که رفتار دینامیکی غیر خطی دارند. میرایی مد بین ناحیه ای توسط قدرت خطوط ارتباطی، طبیعت بارها، پخش بار سیستم، دینامیک ژنراتورها و سیستم های کنترلی آن ها تعیین می شود. عملکرد سیستم در حضور مدهای بین ناحیه ای که میرایی کم دارند خیلی مشکل است.



شکل (۲-۳) نمونه ای از نوسانات بین ناحیه ای [۱]

د) نوسانات مد کنترلی

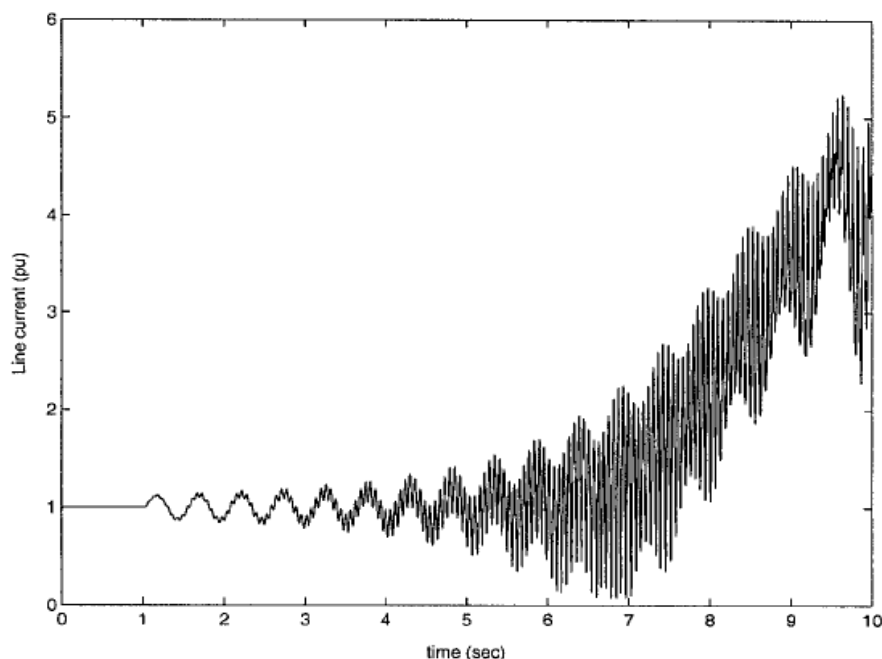
این نوسانات مربوط به ژنراتورها، سیستم های تحریک با تنظیم ضعیف، کنترل های گاورنرها، مبدل های HVDC و SVC می باشند.

ه) نوسانات مد پیچشی

این مدها مربوط به سیستم شفت توربوژنراتور در رنج فرکانسی ۱۰ تا ۴۶ هرتز می باشند. یک نمونه از این نوسانات در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.

معمولاً این مدها وقتی تحریک می شوند که یک توربوژنراتور چند مرحله ای از طریق یک خط جبران شده سری به شبکه وصل شود. یک مد مکانیکی پیچشی سیستم شفت با خازن سری در فرکانس

طبیعی شبکه الکتریکی برهم کنش می کند. رزونانس شفت وقتی آشکار می شود که فرکانس طبیعی سیستم مساوی با فرکانس سنکرون منهای فرکانس پیچشی شود.



شکل (۲-۴) نمونه ای از نوسان یک مد پیچشی [۱]

۲-۲-۲ نقش نوسانات در فروپاشی های شبکه:

نوسانات بین ناحیه ای در بسیاری از موارد باعث تجزیه سیستم می شود. ولی فروپاشی شبکه کمتر اتفاق افتاده است. برخی از موارد مهم فروپاشی سیستم های قدرت در جهان به صورت زیر است [۱]:

- Detroit Edison (DE)-Ontario Hydro (OH)-Hydro Quebec (HQ) (1960s, 1985)
- Finland-Sweden-Norway-Denmark (1960s)
- Saskatchewan-Manitoba Hydro-Western Ontario (1966)
- Italy-Yugoslavia-Austria (1971-1974)
- Western Electric Coordinating Council (WECC) (1964,1996)
- Mid-continent area power pool (MAPP) (1971,1972)
- South East Australia (1975)
- Scotland-England (1978)
- Western Australia (1982,1983)
- Taiwan (1985)

- Ghana-Ivory Coast (1985)
- Southern Brazil (1975-1980,1984)

۳-۲) بررسی عملکرد ژنراتور سنکرون در اغتشاشات

۱-۳-۲) معادله نوسان

یک ژنراتور سنکرون با گشتاور الکترومغناطیسی T_e را در نظر بگیرید که در سرعت سنکرون در حال کار است. در حالت عملکرد عادی گشتاور مکانیکی با گشتاور الکترومغناطیسی برابر است $T_m = T_e$. حال اگر یک اغتشاش به آن وارد شود یک گشتاور شتاب دهنده / شتاب گیرنده $T_a = T_m - T_e$ (اگر $T_a < 0$ گشتاور شتاب گیرنده و اگر $T_a > 0$ ، گشتاور شتاب دهنده) را نتیجه خواهد داد. اگر ممان اینرسی محرک اولیه و ژنراتور را با J نشان دهیم، با توجه به قوانین حرکت داریم:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (۱-۲)$$

که θ_m زاویه مکانیکی روتور نسبت دستگاه مرجع ساکن استاتور است. و برابر است با:

$$\theta_m = \omega_m t + \delta_m \quad (۲-۲)$$

و ω_m سرعت زاویه ای مکانیکی روتور است. اگر از معادله فوق مشتق بگیریم داریم:

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (۳-۲)$$

با استفاده از معادلات ۱-۲ و ۳-۲ خواهیم داشت:

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (۴-۲)$$

با ضرب طرفین در ω_m معادله ۵-۲ به دست می آید:

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e = P_m - P_e \quad (۵-۲)$$

بنابراین معادله نوسان بر حسب ثابت اینرسی M به صورت زیر قابل بیان است:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (6-2)$$

روابط بین پارامترهای الکتریکی δ و ω برحسب پارامترهای مکانیکی به صورت زیر است:

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m, \quad \omega = \frac{p}{2} \omega_m \quad \text{where } p \text{ is pole number}$$

که با جاگذاری آن ها با پارامترهای مکانیکی داریم:

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (7-2)$$

که فرم پریونیت آن به صورت معادله ۸-۲ خواهد بود:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)}, \quad \text{where } M = \frac{2H}{\omega_s} \quad (8-2)$$

این معادله به معادله نوسان موسوم است که در آن P_m و P_e بر حسب پریونیت، H ثابت اینرسی در قدرت مبنای سیستم و δ زاویه قدرت برحسب رادیان الکتریکی هستند.

ژنراتورهای موجود در یک نیروگاه را می توان در محاسبات پایداری گذرا با یک ماشین سنکرون معادل مدلسازی نمود که در آن قدرت الکتریکی ماشین از جمع قدرت های الکتریکی و قدرت مکانیکی آن از جمع قدرت الکتریکی یکایک ژنراتورها به دست می آیند. ثابت اینرسی نیز از معادله ۹-۲ محاسبه می شود [۱۲]:

$$H = H_1 \frac{S_1}{S_b} + H_2 \frac{S_2}{S_b} + \dots + H_m \frac{S_m}{S_b} \quad (9-2)$$

۲-۳-۲) عملکرد ژنراتور سنکرون در اغتشاش شدید (پایداری گذرا)

همانطور که قبلاً نیز اشاره شده است یک سیستم موقعی در صورت اعمال خطا پایدار است که متغیرهای آن، وقتی که زمان به سمت بی نهایت میل می کند، به مقادیر حالت مانا نزدیک شوند. بررسی پایداری بعد از یک اغتشاش شدید مطالعات پایداری گذرا نامیده می شود. در مطالعات پایداری گذرا، برای شبیه سازی یک اغتشاش بزرگ، معمولاً از اتصال کوتاه سه فاز استفاده می شود. ساده ترین روش برای بررسی پایداری گذرا، روش حل قدم به قدم معادله دیفرانسیل است. در این روش معادلات حالت قبل از خطا، حین خطا و بعد از خطای سیستم با یک روش عددی مناسب حل می شوند و تغییرات زوایای بار واحدهای مختلف به دست می آیند. می توان معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم در اثر بروز خطا را به سه دسته تقسیم نمود: اول معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم قبل از خطا، دوم معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم حین خطا و سوم معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم بعد از خطا.

- مدل مناسب برای بررسی پایداری گذرا:

اولین قدم در مطالعه یک سیستم قدرت تعریف مدل مناسب برای آن است. باید دید در مدل کامل چه ساده سازی هایی می توان انجام داد بدون آن که در نتیجه مطالعه تاثیر چندانی داشته باشد. تفاوت اصلی مدل مناسب برای بررسی پایداری گذرا با پایداری سیگنال کوچک (پایداری دینامیکی) در این است که در پایداری سیگنال کوچک با فرض این که دامنه اغتشاشات کوچک است، مدل مناسب خطی است و از تئوری پایداری سیستم های خطی استفاده می شود. در حالی که در بررسی پایداری گذرا فرض بر این است که دامنه اغتشاشات بزرگ است و قطعاً باید از مدل غیر خطی و تئوری پایداری در سیستم های غیر خطی استفاده کرد. در این قسمت ابتدا مدل مناسب برای سیستم تک ماشینه را بررسی می نماییم.

در تعریف مدل مناسب برای حالت گذرا در یک سیستم تک ماشینه عموماً فرضیات ساده کننده ای مطرح می شود:

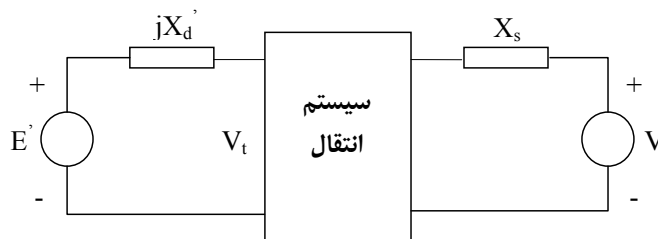
۱- مدل درجه ۲ ژنراتور سنکرون (یعنی فقط معادله بخش مکانیکی روتور) برای این نوع مطالعات کافی است و در آن ها از دینامیک بخش الکتریکی صرف نظر می شود.

۲- ژنراتور را قطب صاف فرض می کنیم [۱۳].

۳- مدل ساده شده ماشین سنکرون با استفاده مناسب از رآکتانس های محور d ، X_d ، X'_d و X''_d تشریح می شود. که برای تحلیل حالت گذرای با زمان خیلی کوتاه از X''_d ، برای تحلیل حالت گذرای با زمان کوتاه از X'_d و برای تحلیل حالت ماندگار از X_d استفاده می شود.

- معادله قدرت-زاویه:

برای تعیین معادله قدرت الکتریکی بر حسب زاویه قدرت در بررسی پایداری گذرا، ماشین سنکرون را با ولتاژ داخلی گذرا (E') سری با رآکتانس گذرا (X'_d) مطابق شکل ۵-۲ مدلسازی می کنیم. ولتاژ ترمینال های ژنراتور را با $V_t = |V_t| \angle \theta$ نشان می دهیم. در حالی که زاویه ها نسبت به یک مرجع سنجیده می شوند. لذا δ نیز زاویه ولتاژ داخلی گذرا نسبت به همان مرجع می باشد، یعنی:

$$E' = |E'| \angle \delta$$


شکل (۵-۲) مدل ماشین سنکرون جهت مطالعه پایداری گذرا [۱۲]

در این شکل ژنراتور سنکرون قدرت خود را از طریق یک سیستم انتقال به سیستم قدرتی منتقل می کند که مدار معادل تونن آن را با ولتاژ V و رآکتانس X_s نشان داده ایم. سیستم انتقال شامل

ترانسفورماتورها، خطوط انتقال، خازن ها و رآکتورهای اصلاح ولتاژ می باشد. اگر سیستم قدرت دارای چنان ظرفیتی باشد که تغییرات قدرت مکانیکی ژنراتور سنکرون و همچنین تغییرات تحریک ژنراتور بر فرکانس و ولتاژ آن سیستم تاثیری نداشته باشد، در این صورت می توان آن را با شین بی نهایت جایگزین نمود و مدار معادل آن را فقط با یک منبع ولتاژ ایده آل V نشان داده و X_s را برابر صفر فرض نمود.

ماتریس ادمیتانس سیستم با در نظر گرفتن X_s و X'_d عبارت است از :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

می دانیم که معادله عمومی پخش بار به صورت زیر است:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (۱۰-۲)$$

با توجه به روابط زیر:

$$Y_{12} = |Y_{12}| \angle \Phi_{12} \text{ و } Y_{11} = |Y_{11}| \angle \Phi_{11} \text{ و } V = |V| \angle \delta_2 \text{ و } E' = |E'| \angle \delta_1$$

قدرت الکتریکی ژنراتور سنکرون از روی معادله پخش بار برابر است با:

$$P_e = P_1 = \text{Real} \{ E'^* (Y_{11} E' + Y_{12} V) \} = \text{Real} \{ |E'|^2 |Y_{11}| \angle \Phi_{11} + |E'| |V| |Y_{12}| \angle (\Phi_{12} + \delta_2 - \delta_1) \} \quad (۱۱-۲)$$

اگر از مقاومت های اهمی شبکه صرف نظر شود $\Phi_{11} = -90^\circ$ و $\Phi_{12} = 90^\circ$ بوده و خواهیم داشت:

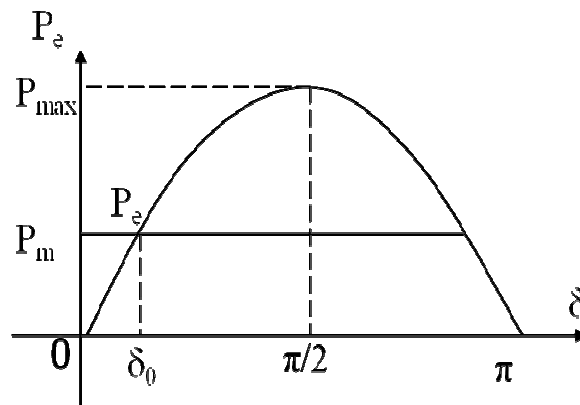
$$P_e = P_{\max} \sin \delta \quad (۱۲-۲)$$

$$\text{که } \delta = \delta_1 - \delta_2 \text{ و } P_{\max} = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \text{ می باشند.}$$

تغییرات توان الکتریکی ژنراتور P_e بر حسب زاویه قدرت δ در شکل ۲-۶ رسم شده است. در شرایط کار عادی نقطه کار δ_0 است. حداکثر قدرت قابل انتقال ماشین که به ازای آن سیستم پایداری خود را از دست ندهد، حد پایداری ماندگار نامیده می شود که در اینجا برابر است با:

$$P_{\max} = \frac{|E^*||V|}{X_{12}}$$

این مقدار در $\delta = 90^\circ$ به دست می آید و بعد از این زاویه هر کوششی برای افزایش قدرت مکانیکی ماشین جهت افزایش δ ، قدرت الکتریکی را کاهش می دهد و شتاب ایجاد شده در ماشین باعث افت بیشتر δ می گردد. در نتیجه قدرت الکتریکی ماشین به صفر می رسد و لذا شبکه و ماشین از نظر الکتریکی از یکدیگر جدا می شوند.



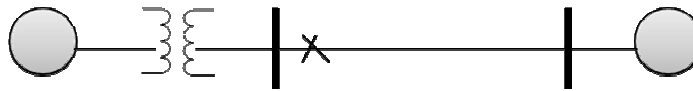
شکل (۶-۲) منحنی تغییرات توان الکتریکی ژنراتور برحسب زاویه قدرت

- اغتشاشات

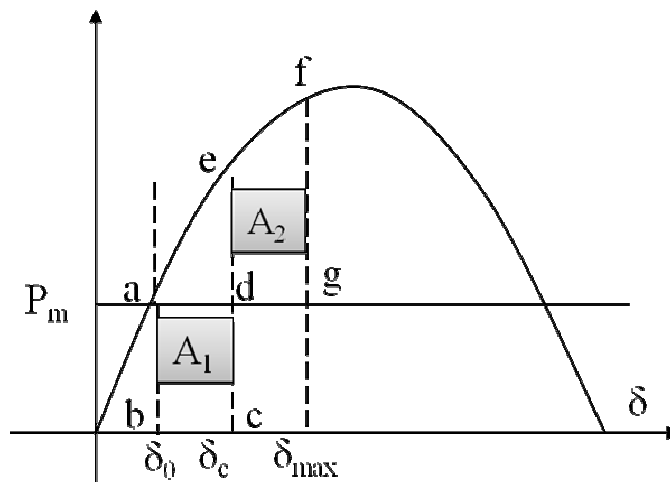
چند نمونه از اغتشاشات شدید به صورت زیر هستند:

- ورود ناگهانی بار به سیستم، مانند کارخانه فولاد
 - از مدار خارج شدن ژنراتورها، مانند تریپ ژنراتور
 - از دست رفتن ناگهانی بار، به عنوان مثال در اثر تریپ خط
 - خطاهایی از قبیل صاعقه، تغییر ناگهانی در قدرت مکانیکی ژنراتور و ...
- برای بررسی پایداری گذرای ژنراتور سنکرون سیستم SMIB می توان از معیار سطوح برابر استفاده نمود. این روش توسط چند شکل به طور مختصر بررسی می شود:

شکل ۸-۲ منحنی توان-زاویه سیستم SMIB را در حالتی که توان خروجی ژنراتور در اثر اتصال کوتاه ۳ فاز به زمین در پایانه ژنراتور به طور ناگهانی صفر شده است را نشان می دهد. خود سیستم نیز در شکل ۷-۲ نمایش داده شده است.



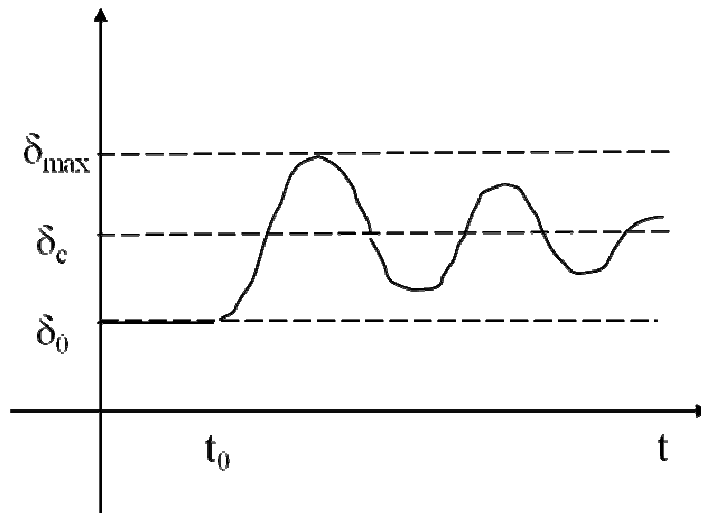
شکل (۷-۲) اتصال کوتاه سه فاز به زمین در پایانه ژنراتور



شکل (۸-۲) منحنی توان زاویه ژنراتور سیستم SMIB در اثر وقوع خطای سه فاز به زمین در پایانه ژنراتور

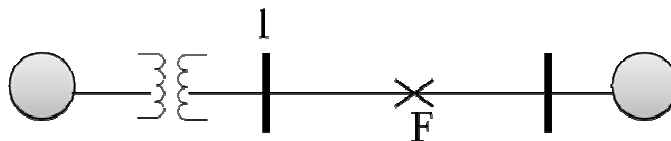
نقطه کار این سیستم قبل از اختلال نقطه a (P_0, δ_0) است که در آن $P_{m0} = P_{e0} = P_0$ می باشد. در حین اتصال کوتاه توان الکتریکی خروجی ژنراتور به صفر تنزل می یابد و نقطه کار به b و با توجه به این که توان مکانیکی ورودی ثابت مانده است، $P_m - P_e > 0$ شده و با توجه به رابطه ۸ زاویه قدرت شروع به افزایش می کند. فرض می کنیم که در زاویه δ_c که مربوط به نقطه c است، خطا بر طرف شود. در این صورت منحنی توان خروجی مانند قبل از خطا بوده و به خاطر اینرسی، نقطه کار d خواهد بود. حال δ به خاطر انرژی ذخیره شده افزایش می یابد، تا جایی که مساحت سطح A_1 با سطح A_2 برابر گردد. یعنی نقطه f . در این نقطه به خاطر این که توان الکتریکی خروجی بیشتر از

مکانیکی است، ژنراتور شتاب منفی می گیرد و δ کاهش می یابد. این نوسانات ادامه می یابند تا میرا شوند. حال اگر نقطه g برابر با نقطه تقاطع منحنی توان الکتریکی و مکانیکی پس از خطا گردد، و A_2 کمتر از A_1 باشد، در این صورت δ به افزایش ادامه داده و ژنراتور ناپایدار خواهد شد. شکل ۲-۹ منحنی تغییرات زاویه قدرت بر حسب زمان را نشان می دهد.

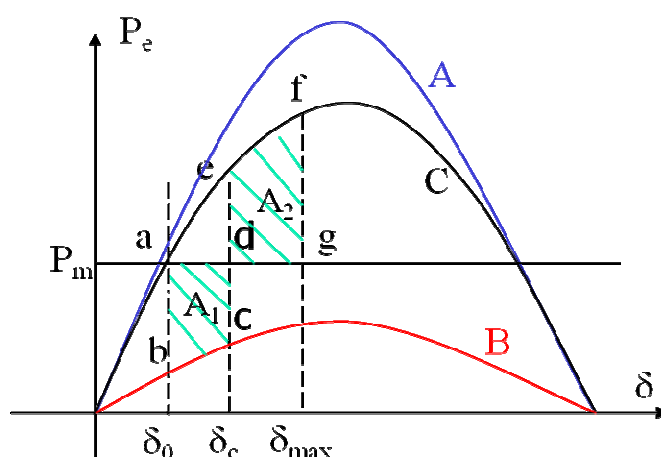


شکل (۲-۹) منحنی تغییرات زاویه قدرت سیستم شکل ۷ در طول زمان

شکل ۲-۱۰ اعمال اتصال کوتاه سه فاز به زمین را در فاصله دور از ژنراتور نشان می دهد. منحنی توان خروجی ژنراتور قبل، حین خطا و بعد از خطا در شکل ۲-۱۱ به ترتیب با A ، B و C نمایش داده شده است. از ذکر جزئیات خودداری می شود [۱۲].



شکل (۲-۱۰) اتصال کوتاه سه فاز به زمین در فاصله دور از پایانه ژنراتور



شکل (۲-۱۱) منحنی توان زاویه ژنراتور سیستم SMIB در اثر وقوع خطای سه فاز به زمین فاصله دور از پایانه ژنراتور

- روش های بهبود پایداری گذرا:

برخی از روش هایی که برای بهبود پایداری گذرا استفاده می شوند به طور مختصر ذکر می شود:

- رفع به موقع خطا

- افزایش حداکثر توان انتقالی سیستم از طریق نصب خازن سری در خط انتقال

- استفاده از PSS در سیستم تحریک

- خارج کردن برخی از ژنراتورها به عنوان راه حل نهایی و ... [۱۳]

- بررسی پایداری سیستم های قدرت بزرگ:

برای بررسی پایداری گذرا در سیستم های قدرت m ماشینه، باید معادلات نوسان را برای m ماشین

نوشت و سپس از روش های آنالیز عددی و با استفاده از کامپیوتر این معادلات را حل کرد. سیستم

قدرتی شامل n شین را که در آن m شین دارای ژنراتور هستند از ۱ تا m نام گذاری می کنیم.

معادلات نوسان که باید حل شوند عبارتند از:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\pi f^0}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \quad \& \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2-13)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - 2\pi f^0 \quad \& i = 1, 2, \dots, m \quad (14-2)$$

بنابر این در هر اختلال باید 2m معادله دیفرانسیل درجه اول را همزمان حل نمود تا منحنی تغییرات ω و δ را برای هر ژنراتور بر حسب زمان به دست آورد و در مورد پایداری گذرای سیستم بحث نمود. برای مطالعه پایداری گذرای سیستم باید مشخصات سیستم را در شرایط کار عادی داشته باشیم. برای این منظور از نتیجه پخش بار سیستم قبل از وقوع اختلال استفاده می کنیم. با محاسبه پخش بار و به دست آمدن P_{Gi}, Q_{Gi} و $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ برای همه شین ها ابتدا جریان و نیرو محرکه یک یک ژنراتورها را به ترتیب زیر محاسبه می کنیم:

$$I_i = \frac{P_{Gi} - jQ_{Gi}}{V_i^*} \quad \& i = 1, 2, \dots, m$$

$$E_i' = V_i + RiI_i + jX_{di}'I_i = |E_i'| \angle \delta_i(0) \quad \& i = 1, 2, \dots, m$$

سرعت زاویه ای هر ژنراتور قبل از خطا نیز برابر است با:

$$\omega_i(0) = 2\pi f^0$$

بنابراین شرایط اولیه $\omega_i(0)$ و $\delta_i(0)$ برای حل معادلات دیفرانسیل ۱۳-۲ و ۱۴-۲ در دسترس می باشد. برای اطمینان از پایداری سیستم های قدرت معمولاً بدترین نوع خطا را که اتصال کوتاه متقارن می باشد در اطراف یکایک ژنراتورها در نظر می گیریم و معادلات نوسان مربوطه را حل می کنیم. در لحظه ای مانند t_c کلیدهای قدرت عمل نموده و اتصال کوتاه را برطرف می نمایند. بنابراین در ادامه حل معادلات باید دقت نمود که از t_c به بعد مشخصات سیستم و معادلات نوسان تغییر می کنند. در خلال اتصال کوتاه ($t=0$ تا $t=t_c$) و همچنین بعد از t_c تا زمان مورد مطالعه ولتاژ شین های دارای ژنراتور ثابت نبوده و برای محاسبات پایداری، تعداد شین ها را از n به $m+n$ تبدیل می کنیم. شین های جدید $n+1, n+2, \dots, n+m$ شین هایی هستند که به ترتیب به شین های $1, 2, \dots, m$ متصل

بوده و به ترتیب دارای ولتاژهای ثابت $E'_1, E'_2, \dots, E'_m$ می باشند. از طرف دیگر برای دقت بیشتر محاسبات، بارهای موجود در شین های سیستم را با ادمیتانس معادل آن ها مدلسازی می کنیم [۱۲].

فصل سوم

مقدمه ای بر کنترل خطی در سیستم های قدرت

خیلی از اجزای مهم در سیستم قدرت خاصیت غیر خطی بالایی دارند، مانند ژنراتورها، گاورنرها و بارها. این اجزا و سیستم های کنترلی مربوط به آن ها حاوی اشباع و محدود کننده ها هستند. تئوری کنترل غیر خطی قابل اعمال به این سیستم هاست ولی محدود به سیستم های کوچک و ساده می باشد. مفهوم تابع انرژی که توسط [۱۴] بیان شده به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت مطالعه پایداری معرفی گردیده است. ساختار یک تابع انرژی تا زمانی ساده است که ژنراتورها را با مدل کلاسیک نمایش داده و بارها را امپدانس ثابت فرض نماییم. در صورت استفاده از مدل های پیچیده تر که سیستم های کنترلی تحریک، کنترل توربین ها، بارهای دینامیک و ... را در نظر می گیرد، یافتن توابع انرژی مناسب سخت است. به هر حال تحلیل سیستم خطی می تواند به عنوان یک ابزار سودمند جهت مطالعه سیستم های قدرت به هم پیوسته به کار رود. هر چند که رفتار سیستم باید خطی فرض شود تا بتواند در این تئوری اعمال شود. خوشبختانه نوسانات فرکانس پایین در یک سیستم قدرت وقتی که توسط اغتشاشات کوچک ایجاد می شود به طور معقول خطی است. تغییرات متغیرهای دینامیک سیستم مانند زاویه و سرعت روتور نیز تحت این شرایط کوچک است و فرض خطی بودن سیستم حول نقطه کار نتایج معقولی را دارد.

رفتار دینامیکی سیستم چند ماشینه در رنج فرکانسی کمتر از ۱ هرتز تا ۳ هرتز توسط یک سری معادلات دیفرانسیل غیر خطی و جبری (DAE^1) بیان می شود. معادلات جبری از تعادل توان شبکه و معادلات جریان استاتور حاصل می شوند. از حالات گذرای استاتور و قسمت فرکانس بالای شبکه در تحلیل نوسانات الکترومکانیکی فرکانس پایین صرف نظر می شود. مقدار اولیه متغیرهای جبری مانند ولتاژ شین ها و زاویه ها از یک پخش بار استاندارد حاصل می شوند. مقدار اولیه متغیرهای دینامیک نیز از جاگذاری مقادیر حاصله از پخش بار در معادلات دیفرانسیل به دست می آیند. مجموعه DAE

1-Differential and Algebraic Equations

حول نقطه تعادل خطی سازی می شوند و یک مجموعه از معادلات جبری و دیفرانسیلی خطی به دست می آید.

$$\dot{x} = f(x, z, u) \quad (1-3)$$

$$0 = g(x, z, u) \quad (2-3)$$

$$y = h(x, z, u) \quad (3-3)$$

که f و g بردارهای معادلات دیفرانسیل و جبری هستند و h برداری از متغیرهای خروجی می باشد. معمولاً ورودی ها مقادیر مرجع هستند، مانند سرعت و ولتاژ در یک واحد تنها. خروجی نیز می تواند توان خروجی یک واحد، ولتاژ یا فرکانس شین، توان خط یا جریان خط و . . . باشد. $x \in R^n$ ، $z \in R^m$ ، $u \in R^p$ و $y \in R^q$ به ترتیب بردارهای متغیرهای حالت، معادلات جبری، ورودی ها و خروجی ها هستند.

نتیجه خطی سازی معادلات ۱-۳ تا ۳-۳ حول نقطه تعادل $\{x_0, z_0, u_0\}$ معادلات زیر است:

$$\Delta \dot{x} = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u \quad (4-3)$$

$$0 = \frac{\partial g}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial g}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial g}{\partial u} \Delta u \quad (5-3)$$

$$\Delta y = \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial h}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial h}{\partial u} \Delta u \quad (6-3)$$

با حذف بردار متغیرهای جبری از معادله ۶-۳ داریم:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (7-3)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (8-3)$$

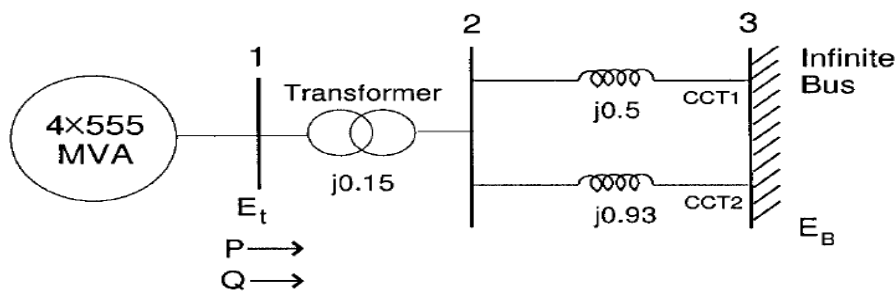
که A ، B ، C و D ماتریس مشتقات جزئی در نقطه تعادل $\{x_0, z_0, u_0\}$ هستند:

$$A = \left[\frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial z} \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x} \right], B = \left[\frac{\partial f}{\partial u} - \frac{\partial f}{\partial z} \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial u} \right]$$

$$C = \left[\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial z} \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x} \right], D = \left[\frac{\partial h}{\partial u} - \frac{\partial h}{\partial z} \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial u} \right]$$

نمایش فضای حالت سیستم قدرت معمولاً حول نقطه کار انجام می شود. در فرم استاندارد نمادهای Δ در معادلات می توانند حذف شوند و تنها x و u باقی می ماند که آن ها را تغییرات در متغیر مربوطه در نظر می گیریم. با این کار معادلات نهایی DAE به دست می آیند که می توانیم تئوری کنترل خطی را روی آن ها بررسی نماییم.

مثال) سیستم نشان داده شده در شکل ۳-۱ مربوط به کتاب کندور است که از شرح جزئیات این سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت خودداری می شود.



شکل (۳-۱) سیستم SMIB مربوط به کتاب کندور [۱۵]

با استفاده از اطلاعات کتاب کندور و دستور $eig(A)$ در *Matlab*، ماتریس بردار ویژه این سیستم به صورت زیر به دست می آید:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -94.66 \\ -49.907 \pm j4.21 \\ -0.2819 \pm j8.625 \\ -17.621 \\ -30.159 \\ -26.31 \\ -3.9119 \\ -0.10432 \end{bmatrix}$$

همانطور که مشاهده می شود، ۲ تا از مقادیر ویژه دارای فرم مختلط هستند. در حالی که باقی آنها اعداد حقیقی می باشند. با توجه به این که قسمت حقیقی تمام مقادیر ویژه منفی است، سیستم مورد نظر حول نقطه کار پایدار می باشد. اگر مقادیر ویژه را با λ نشان دهیم، داریم:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega$$

که σ مربوط به میرایی و ω فرکانس نوسان است. مهندسان بیشتر متمایل هستند که میرایی را با

نسبت میرایی و فرکانس را بر حسب هرتز بیان کنند. بنابراین: $\xi = -\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$ و $f = \frac{\omega}{2\pi}$ تعریف

می شود. پس برای $\lambda_{12} = -49.907 \pm j4.21$ ، $\xi = 0.996$ و $f = 0.67$ است که نشان می دهد یک مُد

بین ناحیه ای است و برای $\lambda_{12} = -0.28 \pm j8.625$ ، $\xi = 0.032$ و $f = 1.373$ است که نشان می دهد

یک مُد محلی است [۱].

فصل چهارم

بررسی روش کلاسیک طراحی پایدارساز سیستم

قدرت

۴-۱) مقدمه

ریشه اصلی نوسان در یک ژنراتور سنکرون تقابل بین گشتاور مکانیکی و گشتاور الکتریکی است. با در نظر گرفتن اثر اصطکاک و با استفاده از معادلات ۱-۲ و ۲-۲ داریم:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m \quad (۱-۴)$$

که در این معادله ω_m سرعت مکانیکی زاویه ای روتور و D ضریب اصطکاک است که عملاً مقدار ثابتی نیست ولی با تقریب آن را ثابت در نظر می گیرند.

با توجه به رابطه ۲-۱۲، T_e از طریق رابطه زیر به دست می آید:

$$T_e = \frac{E'V}{X_{12}} \sin \delta \quad (۲-۴)$$

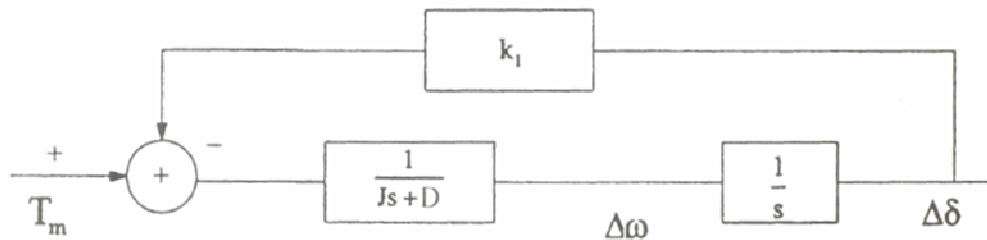
با استفاده از روابط ۱-۴ و ۲-۴ و همچنین جایگذاری ω_m با δ_m داریم:

$$T_m - \frac{E'V}{X_{12}} \sin \delta_m = J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + D \frac{d\delta_m}{dt} \quad (۳-۴)$$

این معادله در عین سادگی اساس کار بسیاری از مطالعات پایداری و نوسانات فرکانس پایین در سیستم های قدرت است. اگر معادله بالا خطی شود داریم:

$$\Delta T_m - \frac{E'V}{X_{12}} \cos \delta_{m0} \cdot \Delta \delta_m = J \frac{d^2 (\Delta \delta_m)}{dt^2} + D \frac{d(\Delta \delta_m)}{dt} \quad (۴-۴)$$

که در آن δ_{m0} زاویه بار در نقطه کار نامی است. با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادله ۴-۴، بلوک دیاگرام سیستم به شکل ۱-۴ در می آید:



شکل (۴-۱) بلوک دیاگرام معادله نوسان [۱۳]

که قسمت بالایی مدل هفرون فیلیپس است و در آن:

$$k_1 = \frac{E'V}{X_{12}} \cos \delta_{m0}$$

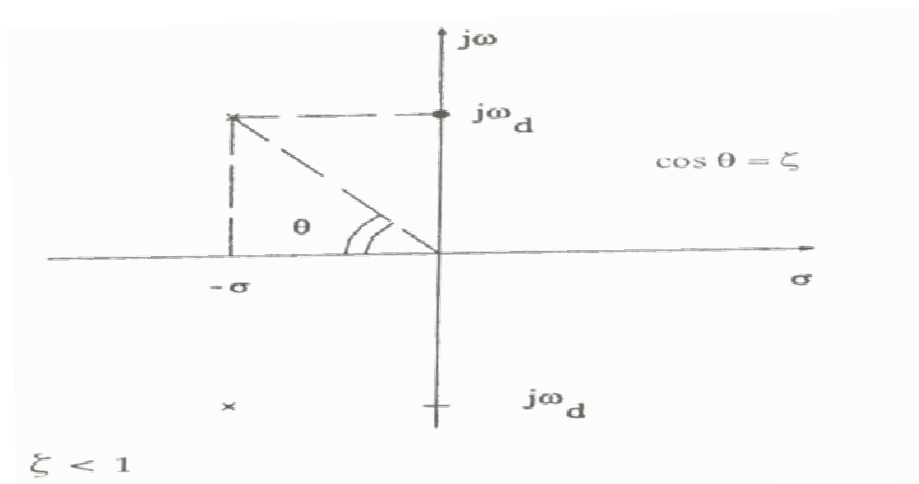
با استفاده از این شکل داریم:

$$G(s) = \frac{1}{Js^2 + Ds + K_1} \quad (۴-۵)$$

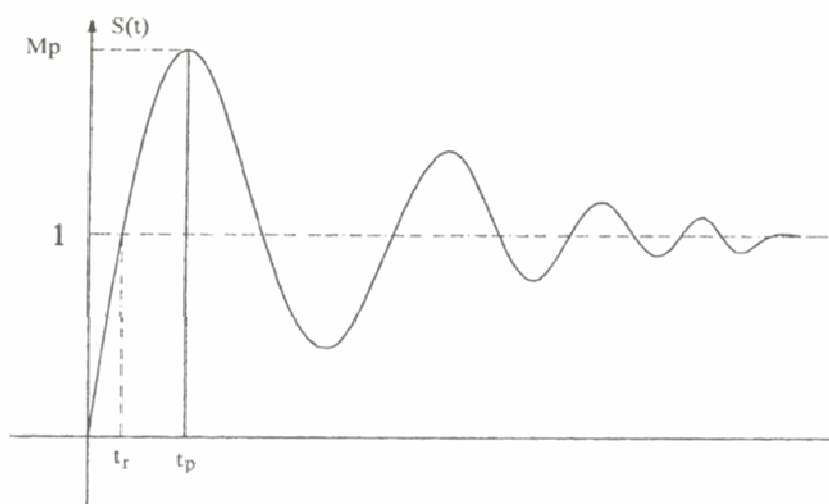
که تابع تبدیل سیستم شکل ۴-۱ می باشد. پاسخ پله یک سیستم درجه ۲ ممکن است نوسانی و یا غیر نوسانی باشد. از آنجا که ژنراتورهای سنکرون طوری ساخته می شوند که با حداکثر راندمان (حداقل تلفات) کار کنند، در این سیستم ها D آن قدر کوچک است که در برخی موارد آن را صفر در نظر می گیرند. لذا ژنراتورهای سنکرون همیشه در حالت نوسانی (فرو میرایی) هستند. در این حالت:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{J}}{s^2 + \frac{D}{J}s + \frac{K_1}{J}} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

شکل ۴-۲ محل قطب های این سیستم درجه ۲ در حالت $0 < \xi < 1$ است و شکل ۴-۳ پاسخ پله این سیستم را نشان می دهد (با فرض $k=1$).



شکل (۲-۴) محل قرار گیری قطب های سیستم درجه ۲ در صفحه مختلط در حالت $0 < \zeta < 1$ [۱۳]



شکل (۳-۴) پاسخ پله سیستم درجه ۲ در حالت $0 < \zeta < 1$ [۱۳]

از نظر یک مهندس کنترل چندین عامل مثل زمان صعود (t_r)، زمان پیک (t_p)، زمان سکون (t_s)، مقدار حداکثر دامنه (M_p) و درصد جهش اولیه ($p.o$) اهمیت دارند که در این بین دو عامل t_s و $P.O$ معمولاً مد نظر قرار می گیرند، زیرا با کنترل آن ها مابقی عوامل نیز کنترل می شوند. در این رابطه داریم:

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad p.o = e^{\frac{-\pi \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\% \quad (۴-۶)$$

که نشان می دهد که درصد فراجاهش اولیه فقط به نسبت میرایی بستگی دارد. وقتی $\xi = 1$ است، درصد فراجاهش صفر است و هرچه ξ به صفر نزدیک می شود، درصد فراجاهش بیشتر است، به طوری که وقتی $\xi = 0$ باشد، درصد فراجاهش صددرصد است. معمولاً در مهندسی کنترل $\xi = 0.7$ مورد قبول است. رابطه ۴-۶ نشان می دهد که برای کاهش زمان سکون باید مقدار σ افزایش یابد. بنابراین هرچه مقدار قطب ها از محور موهومی ($j\omega$) به سمت $-\infty$ دورتر باشند، نوسانات سریع تر میرا می شوند و هر چقدر قطب ها به محور حقیقی نزدیکتر باشند، درصد جهش اولیه کمتر است.

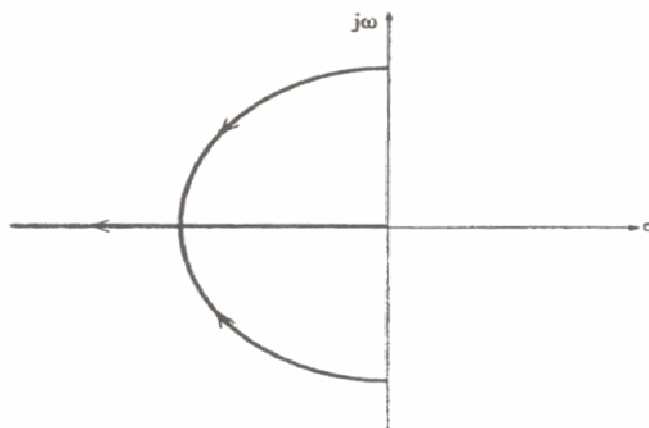
۴-۲) گشتاورهای میرا کننده و سنکرون کننده:

در یک سیستم درجه ۲ مقدار زمان سکون و جهش اولیه به محل قطب های آن بستگی دارد. محل قطب ها نیز به عوامل سیستم (J, k_1, D) بستگی دارد. در این بخش ابتدا عوامل مختلف در تابع تبدیل شکل ۴-۱ و نوسانات LFO^1 بررسی می شوند. در بررسی هر عامل، عوامل دیگر ثابت فرض می شوند. در ضمن این بررسی گشتاورهای میرا کننده و سنکرون کننده نیز معرفی می شوند.

الف) اثر تغییر D :

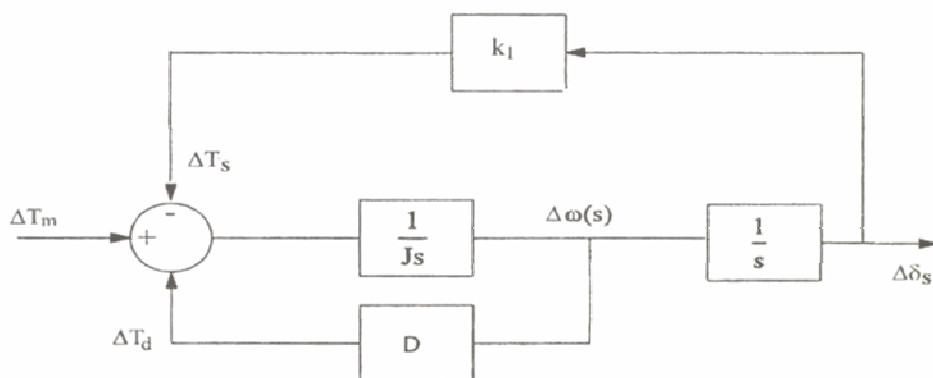
اگرچه در بسیاری از مطالعات مخصوصاً مطالعات مربوط به شبکه، یا از مقدار D صرف نظر می شود و یا مقدار ثابتی فرض می شود، برای بررسی دقیق تر آن باید گفت این مقدار بسته به نقطه کار ماشین سنکرون می تواند متغیر باشد. این مقدار به عوامل مختلفی بستگی دارد. مهمترین این عوامل اصطکاک مکانیکی و میرایی ناشی از سیم پیچ های دمپر است. شکل ۴-۴ اثر تغییر D را روی مکان هندسی قطب های سیستم در حالی که J و k_1 ثابت هستند، نشان می دهد.

همانطور که در شکل ۴-۴ مشخص است، چنانچه D صفر باشد، سیستم دو قطب روی محور $j\omega$ خواهد داشت. یعنی در اثر اغتشاش دائماً نوسان خواهد کرد و ضریب میرایی صفر است. هرچه D زیادتر شود، قطب ها به سمت چپ متمایل تر می شوند (و نوسانات سیستم سریع تر میرا می شوند).



شکل (۴-۴) دیاگرام مکان هندسی ریشه ها وقتی D تغییر می کند [۱۳]

البته دیاگرام شکل ۴-۴ نشان می دهد که چنانچه D از حدی بیشتر شود، قطب ها حقیقی می شود و سیستم از حالت نوسانی در می آید، که این حالت در سیستم های قدرت به هیچ وجه اتفاق نمی افتد، زیرا تلفات توان بسیار بالا می رود و راندمان ژنراتور شدیداً پایین می آید. برای وقوف بیشتر به نقش D شکل ۴-۱ به صورت شکل ۴-۵ رسم می شود.

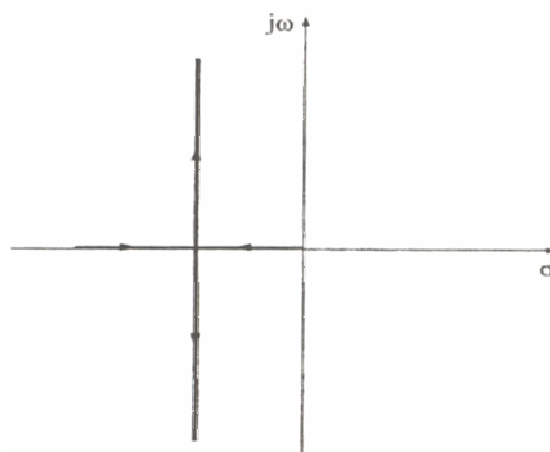


شکل (۵-۴) ترسیم شکل ۴-۱ به صورت متفاوت [۱۳]

همانطور که ملاحظه می شود، به روتور سه نوع گشتاور اعمال می شود: ΔT_m ، گشتاوری که توربین تولید می کند، $D\Delta\omega$ گشتاوری که به خاطر حضور D ایجاد می شود و گشتاوری که از طریق k_1 اعمال می شود ($k_1\Delta\omega$). با توجه به این که، نقش D میرا کردن نوسانات روتور است از این جهت مقدار $T_d = D\Delta\omega$ را اصطلاحاً گشتاور میرا کننده^۲ می نامند.

ب) اثر تغییر k_1 :

مشابه آنچه برای بررسی اثر D روی نوسانات انجام شد، برای بررسی اثر k_1 انجام می شود. k_1 مقداری است که هم به عوامل سیستم و هم به نقطه کار ژنراتور بستگی دارد. شکل ۴-۶ مکان هندسی ریشه های سیستم را وقتی k_1 متغیر و D و J ثابت است، نشان می دهد.



شکل (۴-۶) دیاگرام مکان هندسی ریشه ها وقتی که k_1 تغییر می کند [۱۳]

در این شکل مشخص است که با اضافه کردن k_1 قطب ها به سمت بالا حرکت می کنند و نسبت میرایی (ξ) که برابر $\cos \theta$ است کم، و نوسانات جهش اولیه بیشتری خواهند داشت. پس اضافه شدن k_1 بر خلاف D برای نوسانات مفید نیست.

از طرف دیگر اگر k_1 آنقدر کم شود تا به صفر برسد، در این صورت سیستم درجه ۲ یک قطب روی مبدا خواهد داشت، یعنی یک انتگرال گیر خالص در مسیر قرار می گیرد. این انتگرال گیر خروجی را به صورت شیب دار در حضور یک پله در ورودی تغییر خواهد داد، یعنی سیستم ناپایدار است و از حالت سنکرون خارج می شود. پس برای سنکرون ماندن ژنراتور باید k_1 وجود داشته باشد، از این جهت مقدار $\Delta T_s = k_1 \Delta \delta$ را گشتاور سنکرون کننده^۳ می نامند.

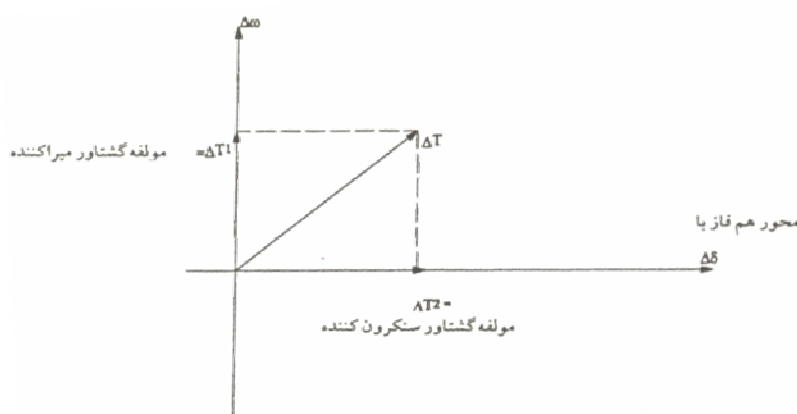
۴-۲-۱) تحلیل گشتاورهای میرا کننده و سنکرون کننده در حوزه فرکانس:

مدل در نظر گرفته شده و همچنین تحلیل انجام شده در قسمت قبل برای گشتاورهای میرا کننده و سنکرون کننده در حوزه لاپلاس بود. تحلیل آن ها در حوزه فرکانس نیز خالی از فایده نیست. اگر به جای s ، $j\omega$ قرار داده شود، داریم:

$$\Delta\omega = j\omega.\Delta\delta \quad (۷-۴)$$

یعنی بین سرعت زاویه ای و زاویه بار ۹۰ درجه اختلاف درجه وجود دارد.

از آنجا که گشتاور سنکرون کننده به صورت $\Delta T_s = k_1 \Delta\delta$ و گشتاور میرا کننده به صورت $\Delta T_d = D \Delta\omega$ تعریف گردیدند، می توان چنین گفت که گشتاور سنکرون کننده هم فاز با زاویه بار و گشتاور میرا کننده هم فاز با سرعت زاویه ای است. پس هر گشتاور اعمال شده به روتور را می توان بر این اساس به دو مولفه سنکرون کننده و میرا کننده تقسیم نمود. شکل ۷-۴ این مساله را به خوبی نشان می دهد [۱۳].



شکل (۷-۴) تقسیم گشتاور اعمالی به دو مولفه سنکرون کننده و میرا کننده در حوزه فرکانس [۱۳]

۴-۳) طراحی کلاسیک پایدارساز سیستم قدرت:

وظیفه PSS افزودن میرایی به نوسانات روتور ژنراتور است که این مقدار با مدوله کردن تحریک ژنراتور برای ایجاد یک مولفه گشتاور الکتریکی هم فاز با تغییرات سرعت روتور انجام می پذیرد. سرعت محور،

انتگرال توان و فرکانس پایه در میان سیگنال های متداول به کار گرفته شده به عنوان ورودی PSS قرار دارند.

– انواع مختلف PSS:

الف) پایدارساز مبتنی بر سیگنال سرعت محور (دلتا-امگا)

ورودی این پایدار ساز همانطور که از نامش نیز پیداست تغییرات سرعت زاویه ای روتور است.

ب) پایدارساز دلتا-P-امگا

ورودی این پایدار ساز علاوه بر تغییرات سرعت زاویه ای روتور، تغییرات توان الکتریکی نیز می باشد.

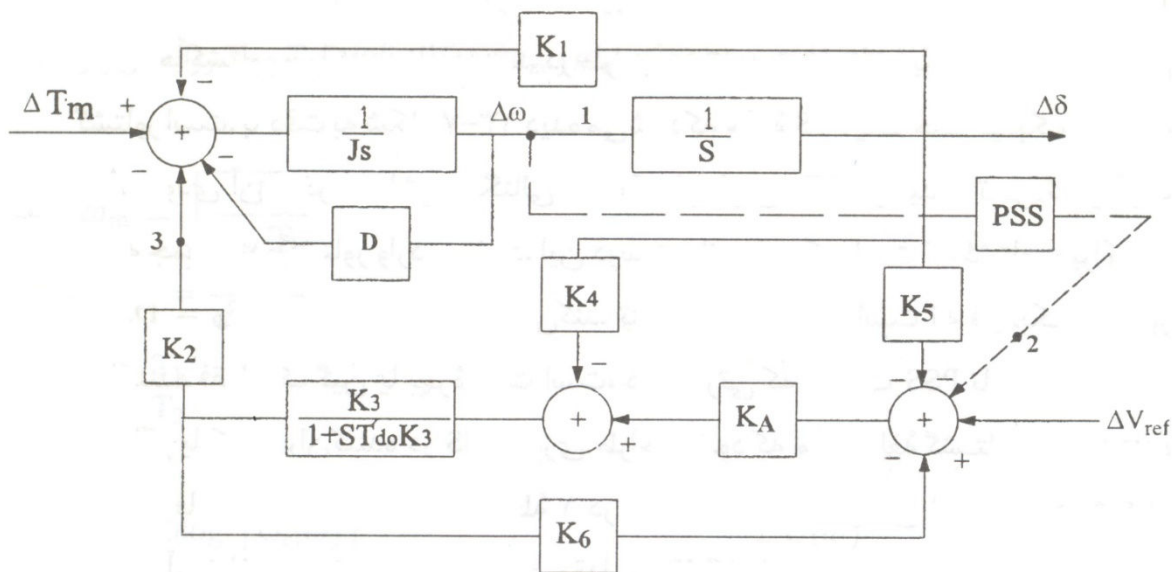
ج) پایدار ساز مبتنی بر فرکانس

در این نوع، از فرکانس پایانه به عنوان سیگنال ورودی پایدارساز بهره گرفته می شود.

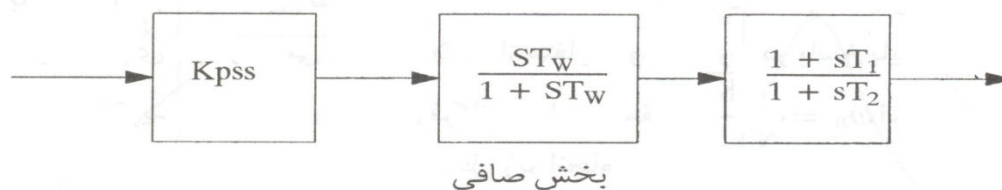
د) پایدار ساز دیجیتالی

امروزه شکل های دیجیتالی PSS ها نیز ساخته شده اند [۱۵].

شکل ۴-۸ محل قرار گرفتن PSS را در مدل هفرون فیلیپس نشان می دهد. همچنین شکل ۴-۹ ساختار یک PSS کلاسیک دلتا-امگا را نشان می دهد که در این بخش تنها روش کلاسیک طراحی این نوع PSS را بررسی می نماییم. این پایدار ساز کنترل کننده ای است که سیگنال خطای فرکانس $\Delta\omega$ را به عنوان سیگنال خطا می پذیرد و یک سیگنال کنترل اضافی برای حلقه AVR تولید می کند که باعث میرا شدن سریع تر نوسانات LFO می گردد. در این شکل k_{PSS} مقدار بهره ای است که روی خطای فرکانس عمل و آن را تقویت می کند. بخش صافی یک مشتق گیر است و فقط به تغییرات اجازه عبور می دهد و مقدار مانا را تقویت می کند. مقدار T_w در صافی آنقدر بزرگ انتخاب می شود که در کار جبران کننده مزاحمتی ایجاد ننماید. در این پایدار ساز یک بلوک جبران سازی فاز در نظر گرفته شده است ولی در صورت لزوم می توان از دو بلوک جبران سازی استفاده نمود.



شکل (۸-۴) محل قرار گیری PSS در مدل هفرون فیلیپس [۱۳]



شکل (۹-۴) ساختار PSS کلاسیک با یک جبران ساز پیش فاز- پس فاز

دیدیم که نقش D میرا کردن نوسانات روتور است. از این جهت مقدار $T_d = D\Delta\omega$ را اصطلاحاً گشتاور میرا کننده نامیده شد. در طراحی PSS به روش کلاسیک هدف تقویت این گشتاور است. با دقت به شکل ۸-۴ دیده می شود که حلقه PSS یک فیدبک است که $\Delta\omega$ ورودی آن و خروجی اش سیگنالی است که از طریق AVR و میدان تحریک و بلوک k_2 به جمع کننده گشتاور وارد می شود. این درست مانند فیدبکی است که گشتاور میرا کننده $T_d = D\Delta\omega$ در شکل ۵-۴ ایجاد می کند. تنها تفاوت در این است که فیدبک گشتاور میرا کننده فقط یک گین یا بهره ثابت است، در صورتی که فیدبک PSS تابع تبدیل دارد. حال اگر بلوک جبران کننده در PSS طوری طراحی شود که مثل حلقه گشتاور میرا

کننده اختلاف فازی بین نقطه ابتدایی (نقطه ۱ در شکل ۸-۴) و نقطه انتهایی (نقطه ۳ در شکل ۸-۴) آن نباشد، می توان با زیاد کردن مقدار k_{PSS} گشتاور میرا کننده را تقویت کرد.

تنها سؤال باقی مانده این است که جبران این اختلاف فاز در چه فرکانسی باید باشد. زیرا اگر تابع تبدیل بین نقطه ۲ و ۳ در شکل ۸-۴ $G(s)$ نامیده و به جای s ، $j\omega$ گذاشته شود، به ازای هر فرکانسی یک اختلاف فاز متفاوت وجود دارد. در پاسخ باید گفت که در هر صورت تقریب وجود دارد و بهترین فرکانس طبیعی مقدار $\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{J}}$ است. پس به طور خلاصه در طراحی PSS مراحل زیر انجام می شود:

(۱) مدل هفرون فیلیپس برای ژنراتور به دست می آید (عوامل مدل محاسبه می شوند).

(۲) تابع تبدیل نقطه ۲ و ۳ به دست می آید و $G(s)$ نامیده می شود.

(۳) مقدار $\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{J}}$ محاسبه می شود.

(۴) مقدار زاویه $\angle G(j\omega_n)$ محاسبه می شود.

(۵) PSS طوری طراحی می شود که در فرکانس ω_n مقدار $\angle G(j\omega_n)$ را جبران نماید، به

طوری که بین نقاط ۱ و ۳ هیچ اختلاف فازی نباشد.

(۶) k_{PSS} طراحی می شود.

با توجه به توضیحات بالا تنها دو مرحله آخر به بحث بیشتر نیاز دارد. روش های طراحی جبران کننده پیش فاز در کتاب های کنترل خطی آمده است. دیاگرام بد یک جبران کننده پیش فاز به شکل

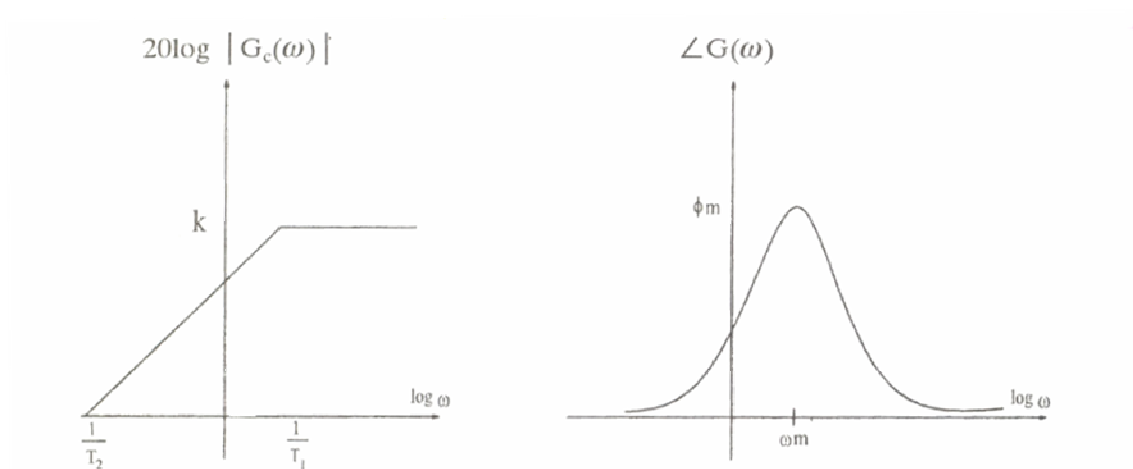
$$G_c(s) = \frac{1+sT_1}{1+sT_2}, \quad (T_1 > T_2), \quad \text{به صورت شکل ۱۰-۴ است.}$$

در دیاگرام شکل ۱۰-۴ ثابت می شود که φ_m و ω_m با T_1 و T_2 روابط زیر را دارند:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{1}{T_1 T_2}} \quad (۸-۴)$$

$$\sin \varphi_m = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \quad (۹-۴)$$

$$\alpha = \frac{T_1}{T_2} \quad (۱۰-۴)$$



شکل (۱۰-۴) دیاگرام بد یک جبران ساز پیش فاز [۱۳]

برای محاسبه T_1 و T_2 در طراحی PSS، ابتدا ω_m برابر ω_n و سپس φ_m برابر $-\angle G(j\omega_n)$ قرار می گیرد و سپس با استفاده از روابط فوق T_1 و T_2 محاسبه می شوند.

پس از طراحی T_1 و T_2 مرحله آخر تعیین مقدار k_{PSS} است. از نظر تئوری، حال که رابطه نقطه ابتدایی $\Delta\omega$ با نقطه انتهایی هم فاز شده است، هرچه k_{PSS} بزرگتر باشد، گشتاور میرا کننده بیشتر است ولی از نظر عملی، به دلیل محدودیت های هر سیستم و خطی نبودن آن، نمی توان k_{PSS} را از حدی بیشتر کرد. مقدار بهینه این عامل را می توان با استفاده از شبیه سازی و سعی و خطا به دست آورد.

در اکثر مواقع PSS برای تقویت پایداری مد نیروگاه یا مد بین ناحیه ای لازم است اما باید توجه داشت که اگرچه این مد مورد توجه خاص است، لیکن باید جبران سازی فاز به گونه ای انجام شود که PSS در میرایی برروی بازه وسیعی از فرکانس، در برگیرنده هر دو مد محلی و بین ناحیه ای نقش داشته باشد.

نتایج تحقیقات نشان می دهد که در یک سیستم چند ماشینه طراحی PSS برای تمام ماشین ها لازم نیست. لذا بحثی تحت عنوان جایابی بهینه PSS در تحقیقات دینامیک سیستم های قدرت مطرح است. در این تحقیقات هدف پیدا کردن واحد هایی است که طراحی PSS برای آن ها دینامیک کل سیستم را بهتر می کند [۱۳].

فصل پنجم

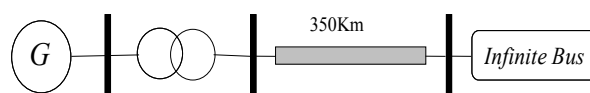
معرفی سیستم تحت مطالعه و اجزای آن

۵-۱) مقدمه:

در سیستم های قدرت منابع اولیه انرژی الکتریکی ژنراتورهای سنکرون هستند. مساله پایداری سیستم های قدرت در وهله اول حفظ سنکرونیزم ماشین های سنکرون به هم پیوسته است. همچنین پایداری وابسته به چندین جزء دیگر مثل گاورنرها، سیستم های تحریک ژنراتورها، بارها، ادوات Fact و ... می باشد. بنابراین فهم ویژگی ها و مدل کردن عملکرد آن ها از اهمیت اساسی در بررسی پایداری سیستم های قدرت برخوردار است. در این بخش به معرفی مدل سیستم نمونه و اجزای مختلف آن پرداخته می شود.

۵-۲) سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت

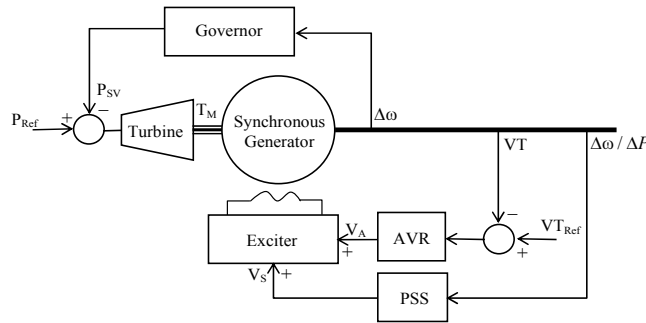
هدف اولیه یک PSS میرا کردن مد محلی است [۱۶]. بنابر این اولین سیستمی که طراحی PSS روی آن انجام گردیده است، سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت، SMIB می باشد. در سیستم SMIB، یک ژنراتور سنکرون 500MVA، 13.8KV و 50Hz از طریق یک ترانسفورماتور 13.8/400KV، 500MVA و یک خط انتقال 350Km، 400KV به یک شین بی نهایت متصل شده است [۱۷]. شکل ۵-۱ این سیستم را نشان می دهد. در بخش بعدی اجزای تشکیل دهنده مدل به کار گرفته شده این سیستم در *Matlab Simulink* شرح داده می شود. مقدار عددی پارامترهای این سیستم در ضمیمه آمده است.



شکل (۵-۱) دیاگرام تک خطی SMIB [۱۷]

۵-۲-۱) واحد تولیدی

واحد تولیدی به کار گرفته شده در این سیستم که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است، متشکل از ژنراتور سنکرون به عنوان اصلی ترین بخش، گاورنر، سیستم تحریک و توربین هیدرولیک به عنوان محرک اولیه است.



شکل (۵-۲) بلوک دیاگرام واحد تولیدی [۱۷]

الف) ژنراتور سنکرون

بخش الکتریکی ژنراتور سنکرون توسط ۶ معادله مرتبه ۱ مدل شده است.

$$U_d = -r_s i_d - \omega \phi_q + d\phi_d / dt \quad (۱-۵)$$

$$U_q = -r_s i_q + \omega \phi_d + d\phi_q / dt \quad (۲-۵)$$

$$U'_{fd} = r'_{fd} i'_{fd} + d\phi'_{fd} / dt \quad (۳-۵)$$

$$U'_{kd} = r'_{kd} i'_{kd} + d\phi'_{kd} / dt \quad (۴-۵)$$

$$U'_{kq1} = r'_{kq1} i'_{kq1} + d\phi'_{kq1} / dt \quad (۵-۵)$$

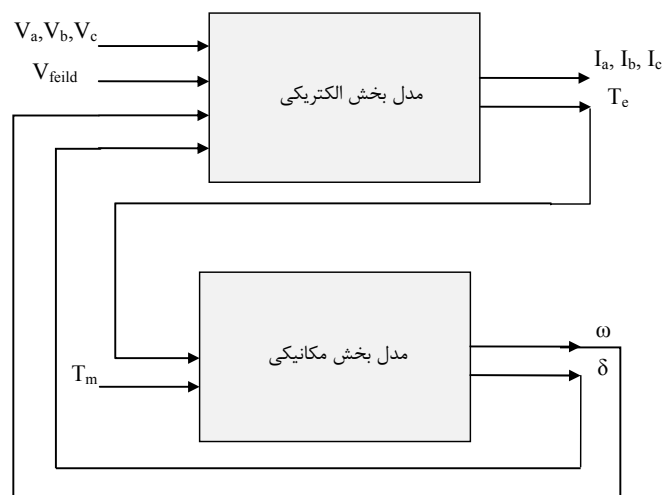
$$U'_{kq2} = r'_{kq2} i'_{kq2} + d\phi'_{kq2} / dt \quad (۶-۵)$$

دینامیک روتور نیز توسط معادلات زیر مدل شده است.

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (T_M - T_E) dt - K_d \Delta\omega(t) \quad (۷-۵)$$

$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0 \quad (۸-۵)$$

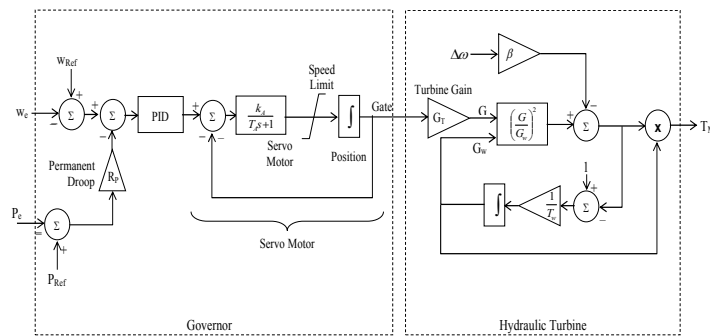
نمادهای استفاده شده در این معادلات، در ضمیمه شرح داده شده است. همچنین شکل ۳-۵ نحوه تعامل قسمت های مکانیکی و الکتریکی را نشان می دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، قسمت الکتریکی دارای ۴ ورودی ولتاژهای فاز، ولتاژ تحریک، سرعت زاویه ای و زاویه روتور و دارای ۲ خروجی جریان ها و گشتاور الکتریکی است. همچنین قسمت مکانیکی دارای ۲ ورودی گشتاور الکتریکی و گشتاور مکانیکی، و ۲ خروجی سرعت زاویه ای و زاویه روتور است.



شکل (۳-۵) ارتباط بین بخش های الکتریکی و مکانیکی در مدل ماشین سنکرون

ب) توربین و گاورنر

مدل توربین هیدرولیک و گاورنر که از مرجع [۱۸] استخراج گردیده است به صورت شکل ۴-۵ می باشد. همچنین مدل شفت شامل یک سیستم ۴ جرمی است که با احتساب جرم شفت ماشین سنکرون، یک سیستم ۵ جرمی را تشکیل می دهد. شفت با لختی H ، ضرایب میرایی D و ضرایب سختی k مشخص می گردد.



شکل (۵-۴) مدل توربین هیدرولیک و گاورنر [۱۸]

ج) سیستم تحریک

اگر بار حقیقی به شبکه اضافه شود، فرکانس شبکه افت می کند. این افت فرکانس با گاورنر جبران می گردد و شیر سوخت (مثلاً بخار) ورودی به توربین باز می شود. در نتیجه هم توان لازم از طریق توربین به ژنراتور تحویل داده می شود و هم فرکانس به حالت عادی باز می گردد. حال اگر بار واکنشی مصرف کننده زیاد شود ولتاژ افت می کند. در این حالت حلقه کنترل AVR ولتاژ سیم پیچ تحریک را زیاد می کند، تا علاوه بر تامین توان واکنشی مصرف کننده، ولتاژ ژنراتور به حالت عادی باز گردد. در این سیستم ولتاژ ترمینال اندازه گیری و با مقدار دلخواه مقایسه می شود. سپس ولتاژ میدان تحریک ژنراتور در جهت کم کردن خطا تغییر می کند. قدرت مصرفی سیستم های کنترل ولتاژ معمولاً بین ۰/۲ و ۰/۸ قدرت نامی ژنراتور است.

سیستم های تحریک را یسته به نوع سیستم تحریک آن ها به سه دسته تقسیم می کنند:

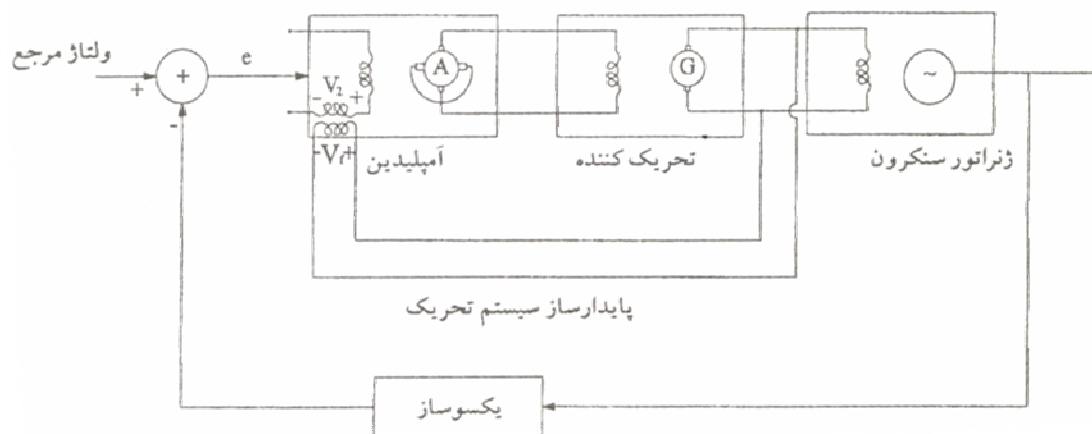
- سیستم های تحریک جریان مستقیم

- سیستم های تحریک جریان متناوب

- سیستم های تحریک استاتیک

شکل ۵-۵ بلوک دیاگرام کلی یک سیستم تحریک جریان مستقیم را نشان می دهد. در این سیستم کنترل ولتاژ، (پس از اندازه گیری، یکسوسازی ولتاژ و مقایسه آن با مقدار دلخواه) سیگنال خطا از

یک تقویت کننده الکترومکانیکی (آمپلیدین) عبور می کند. سپس سیگنال خطای تقویت شده میدان تحریک یک ژنراتور را تحریک می کند [۱۳].

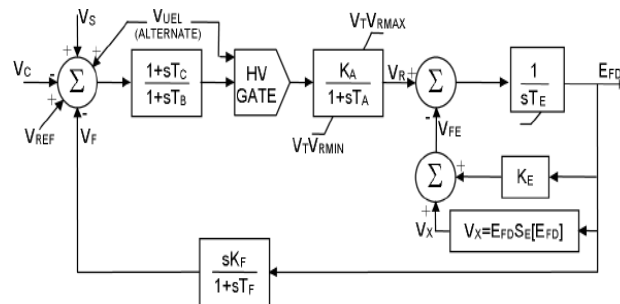


شکل (۵-۵) بلوک دیاگرام کلی سیستم تحریک جریان مستقیم [۱۳]

مدل استفاده شده برای این سیستم، سیستم تحریک جریان مستقیم است، که مطابق استاندارد IEEE 421.5 است [۷]. شکل ۵-۶ بلوک دیاگرام این مدل را نشان می دهد.

ورودی اصلی این مدل ولتاژ خروجی V_c می باشد که همان ولتاژ ترمینال ژنراتور است. این ورودی از ولتاژ مرجع V_{ref} کم می شود. فیدبک پایدارساز تحریک V_f و سیگنال پایدارساز سیستم قدرت V_s نیز به ترتیب با علامت های مثبت و منفی با V_c جمع می شوند تا سیگنال خطا را ایجاد نمایند. در حالت ماندگار V_s و V_f صفر هستند. سیگنال خطا در رگولاتور تقویت می شود. k_A و T_A به ترتیب بهره و ثابت زمانی رگولاتور هستند. ثابت های زمانی T_C و T_B در تابع تبدیل $\frac{1+sT_C}{1+sT_B}$ که مربوط به رگولاتور است، آنقدر کوچک هستند که می توان از آن ها صرف نظر کرد.

ولتاژ خروجی رگولاتور V_R ، برای کنترل تحریک کننده استفاده می شود، که در اینجا با تابع تبدیل $\frac{K_E}{1+sT_E}$ نمایش داده شده است. همچنین فیدبک V_X اثر اشباع را برای تحریک کننده در نظر می گیرد. در این پروژه از اثر اشباع صرف نظر شده است..



شکل (۵-۶) مدل سیستم تحریک [۷]

۵-۲-۲) ترانسفورماتور قدرت

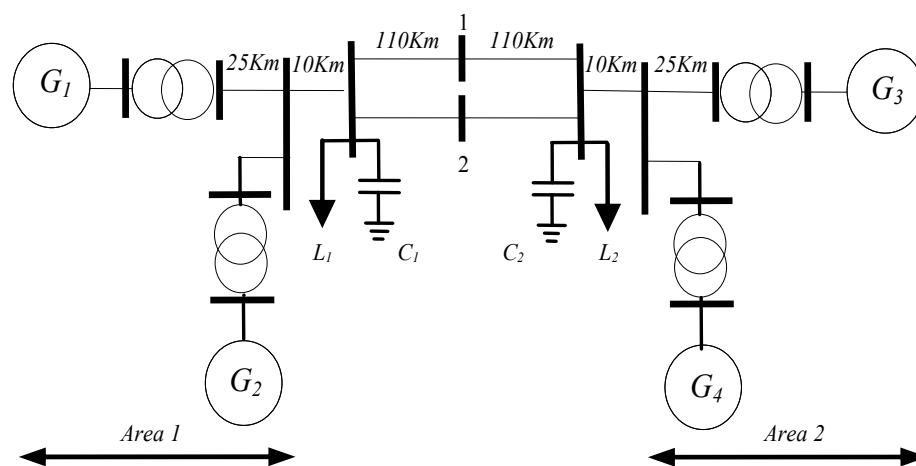
برای مدل کردن این بخش از سیستم قدرت از مدل ترانسفورماتور سه فاز دو سیم پیچه *Matlab* استفاده گردیده است. در این مدل اشباع و تلفات هسته، تلفات مسی و شار ناشی در نظر گرفته شده است.

۵-۲-۳) خط انتقال و بارها

جهت مدل کردن خط انتقال از مدل گسترده استفاده شده است. همچنین بارهای اکتیو و راکتیو به صورت امپدانس ثابت و با اتصال ستاره در نظر گرفته شده اند.

۵-۳) سیستم ۴ ماشینیه ۲ ناحیه ای کندور:

طراحی PSS برای سیستمی که دارای نوسانات بین ناحیه ای قوی می باشد مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱۶]. در این پروژه سیستم ۴ ماشینیه کندور که دارای ویژگی فوق می باشد برای بررسی طراحی PSS استفاده گردیده است. شکل ۷-۵ دیاگرام تک خطی این سیستم را نشان می دهد .



شکل (۵-۷) دیاگرام تک خطی سیستم دو ناحیه ای کندور [۱۵]

این سیستم که در کتاب کندور معرفی شده است [5]، شامل دو ناحیه مشابه متصل شده با یک ارتباط ضعیف است. هر ناحیه از دو واحد کنار هم، هر کدام دارای مقدار نامی 900MVA و 20KV، تشکیل شده است. سیستم با ارسال 400Mw از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ عمل می کند و واحدهای تولید کننده به صورت زیر بار گذاری شده اند [۱۵] :

G_1 :	$P = 700 \text{ MW}$	$Q = 185 \text{ MVar}$	$E_t = 1.03 < 20.2^\circ$
G_2 :	$P = 700 \text{ MW}$	$Q = 235 \text{ MVar}$	$E_t = 1.01 < 10.5^\circ$
G_3 :	$P = 719 \text{ MW}$	$Q = 176 \text{ MVar}$	$E_t = 1.03 < -6.8^\circ$
G_4 :	$P = 700 \text{ MW}$	$Q = 202 \text{ MVar}$	$E_t = 1.01 < -17^\circ$

مقدار عددی پارامترهای این سیستم در ضمیمه آمده است. در ادامه مدل هریک از بخش های این سیستم معرفی می شود.

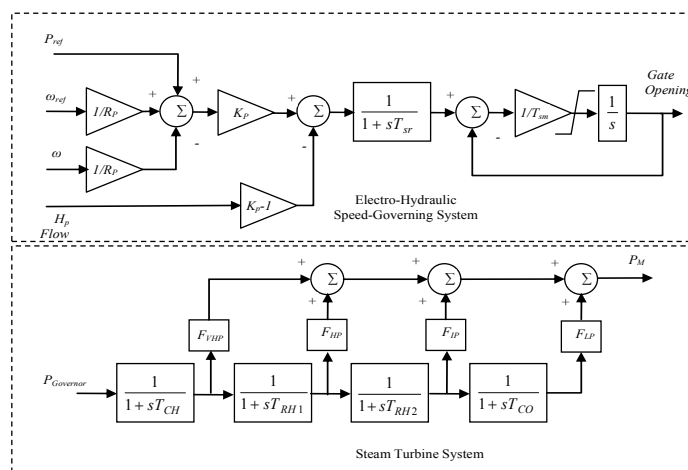
۵-۳-۱) واحد تولیدی

الف) ژنراتور سنکرون

مدل ژنراتورهای سنکرون به کار گرفته شده در این سیستم مشابه با SMIB است.

ب) توربین و گاورنر

مدل استفاده شده برای توربین بخار و گاورنر، مدل کاملی از محرک اولیه بخاری شامل یک سیستم کنترل (گاورنر) سرعت، یک توربین بخار ۴ مرحله ای و یک شفت می باشد. بخش کنترل سرعت این سیستم متشکل از یک رگولاتور، یک رله سرعت و یک سرو موتور که باز بودن دریچه بخار را کنترل می کند می باشد. همانطور که از شکل ۵-۸ نیز مشخص است توربین بخار متشکل از ۴ بخش است که هر کدام با یک تابع تبدیل درجه ۱ مدل شده اند. بخش اول مخزن بخار است در حالی که سایر بخش ها بازگرمکن و تقاطع ها را مدل می کنند. فشار بویلر ثابت و برابر با ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است [۱۹]. همه سیستم های توربین بخار ترکیبی از شیرهای کنترل شونده توسط گاورنر در ورودی توربین فشار بالا (یا فوق فشار بالا) برای کنترل جریان بخار استفاده می کنند. مخزن بخار و لوله های ورودی نخستین کپسول توربین، همچنین بازگرمکن ها و تقاطع ها همه دارای تاخیر بین حرکت شیر و تغییر در جریان بخار هستند. هدف اصلی در مدل کردن سیستم بخار برای مطالعات پایداری در نظر گرفتن این تاخیرهاست. تغییرات فشار در ورودی شیرهای کنترل شونده توسط گاورنر نیز ممکن است در برخی از مطالعات پایداری مهم باشند [۱۹].



شکل (۵-۸) گاورنر و توربین بخار [۱۹]

ج) سیستم تحریک

سیستم تحریک از نوع dc بوده و بر اساس IEEE STD 421.5 مدل شده است [۷].

۵-۳-۲) ترانسفورماتور قدرت، خط انتقال و بار

ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و بارها مشابه SMIB مدل شده اند.

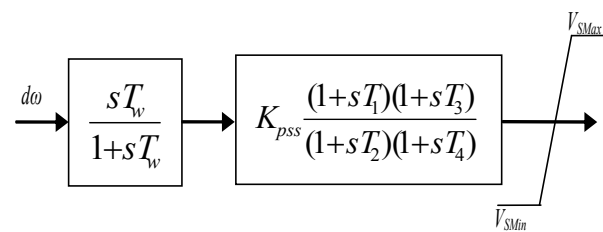
۵-۴) پایدارساز سیستم قدرت (PSS)

در این پروژه از دو نوع پایدارساز دلتا-امگا و دیجیتالی استفاده شده که در ادامه شرح داده می شوند.

الف) پایدارساز سیستم قدرت دلتا-امگا

متداول ترین نوع پایدارساز ها، پایدارساز دلتا-امگا است. این پایدارساز در شکل ۵-۹ نمایش داده شده است. ساختار این PSS مشابه شکل ۴-۹ متشکل از یک بهره، یک صافی، یک جبران کننده پیش فاز-پس فاز و در نهایت یک محدود کننده می باشد، با این تفاوت که در شکل ۵-۹ جبران ساز فاز متشکل از ۲ بلوک جبران سازی فاز می باشد.

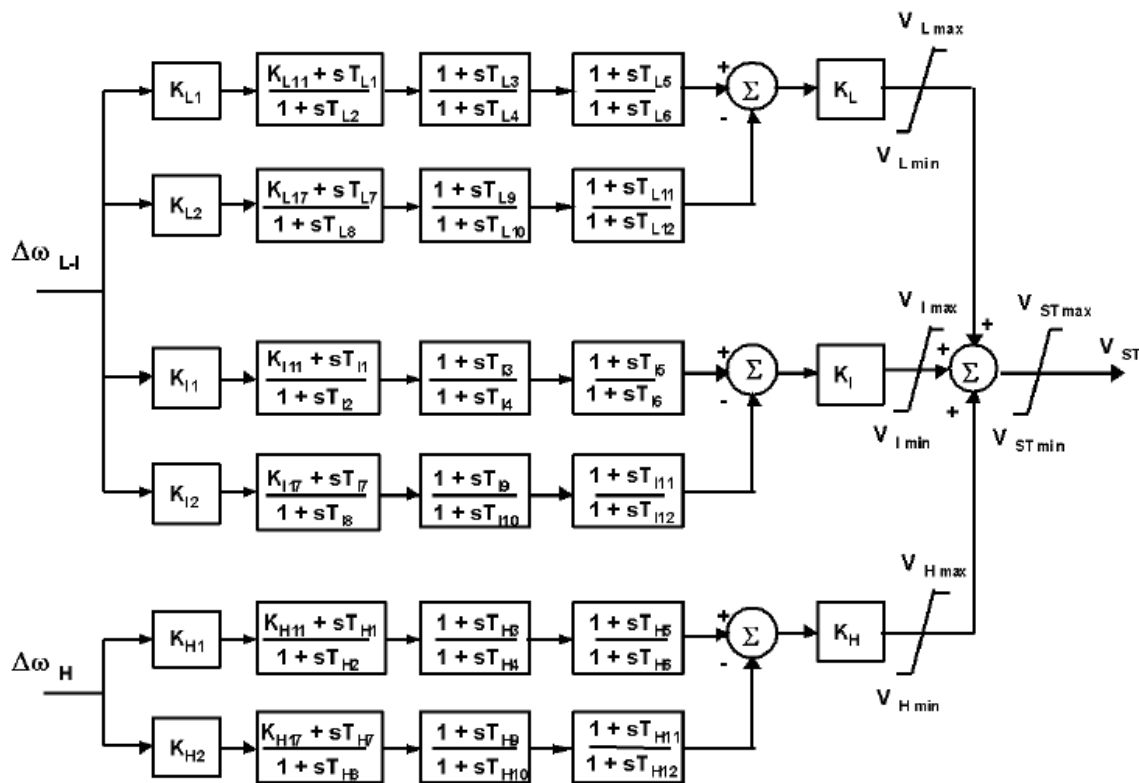
همانطور که در فصل ۴ نیز اشاره شد، مدار صافی یک فیلتر بالا گذر است که تغییرات حالت پایدار را فیلتر می کند و باعث می شود تا تغییرات سرعت، توان و فرکانس در حالت پایدار روی سیستم تحریک اثر نکند. انتظار ما این است که PSS تنها در تغییرات حالت گذرا وارد عمل شود. T_w باید به نحو مناسبی انتخاب شود. مقدار T_w برابر با ۱ الی ۲ برای مدهای محلی و ۱۰ الی ۲۰ برای مدهای بین ناحیه ای انتخاب مناسبی است. مرجع [۱۵] مقدار ۱۰ را برای T_w مناسب دانسته است.



شکل (۵-۹) پایدار ساز سیستم قدرت متداول [۱۵]

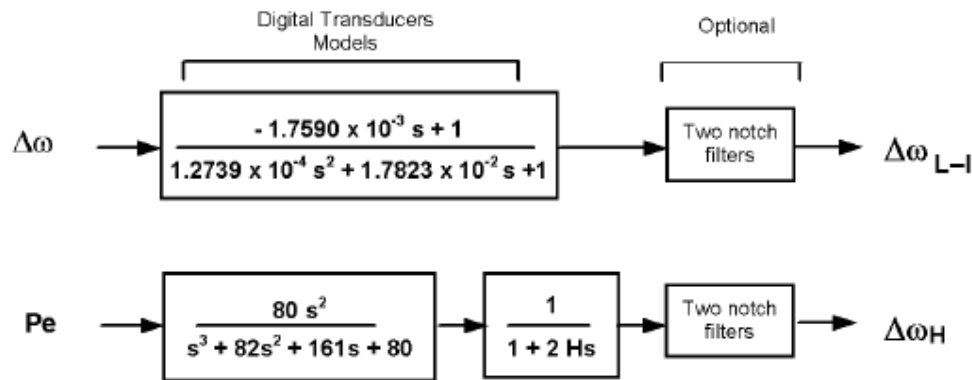
ب) پایدار ساز سیستم قدرت چند بانده (PSS4B)

همانطوری که از اسم این پایدار ساز دیجیتال پیداست، از چند باند تشکیل شده است. ۳ باند جداگانه که برای فرکانس های پایین، میانی و بالا طراحی می شوند. باند پایین با مد عمومی، باند میانی با مد بین ناحیه ای و باند بالا با مد محلی مرتبط است. هر کدام از سه باند یاد شده از یک فیلتر میان گذر، بهره و محدود کننده تشکیل شده اند. خروجی سه باند با هم جمع می شوند و سیگنال از میان یک محدود کننده نهایی که V_{stab} را محدود می کند، عبور می نماید. برای اطمینان از میرایی خوب، PSS4B باید فاز مثبت در تمامی فرکانس های ذکر شده ایجاد کند تا فاز منفی بین سیستم تحریک و گشتاور الکتریکی را جبران کند. شکل ۵-۱۰ مدل کامل PSS4B را نشان می دهد [۷].



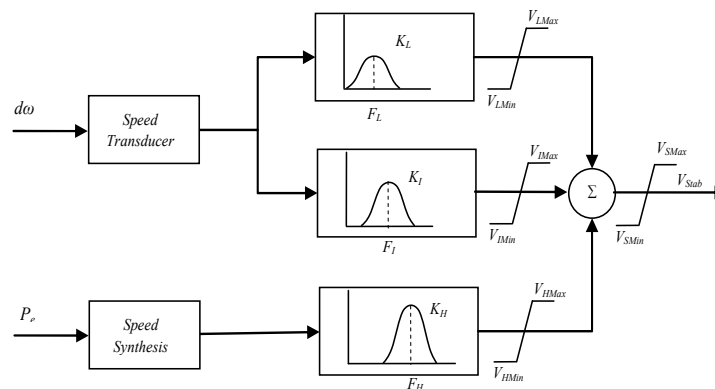
شکل (۵-۱۰) بلوک دیاگرام PSS4B [۷]

PSS4B انحراف سرعت روتور را از ۲ طریق متفاوت به دست می آورد، $\Delta\omega_{L-I}$ باندهای پایین و میانی را تغذیه می کند، در حالی که $\Delta\omega_H$ متعلق به باند بالاست. جهت تولید سیگنال های $\Delta\omega_{L-I}$ و $\Delta\omega_H$ ، $\Delta\omega$ و P_e از ۲ تراگردان که در شکل ۵-۱۱ نمایش داده شده عبور می کنند. فیلترهای notch تنها برای حذف فرکانس پیچشی در توربوژنراتورها استفاده می شوند. توضیح بیشتر این تراگردان ها در [۷] آمده است.



شکل (۵-۱۱) بلوک دیاگرام تراگردان PSS4B [۷]

ورودی این پایدارساز تغییرات سرعت زاویه ای روتور است و خروجی آن به سیستم تحریک می رود. همانطور که از شکل ۵-۹ مشخص می باشد، این مدل دارای پارامترهای بسیاری است که باید در طول طراحی تعیین شوند. از آنجایی که این تعداد زیاد پارامترها یافتن جواب بهینه توسط الگوریتم را مشکل می سازد، در این بررسی از مدل ساده شده PSS4B استفاده می کنیم. طراحی تعیین شوند. شکل ۵-۱۲ مدل ساده شده PSS4B را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۲) شکل ساده شده PSS4B

فصل ششم

مقدمه ای بر تئوری بازی و کاربرد آن در بهینه سازی

۶-۱) مقدمه

موقعیت های زیادی پیش می آیند که با تصمیم گیری برای اتخاذ بهترین تصمیم یا بهترین استراتژی از میان چندین موقعیت مواجه می شویم. برای نمونه ما ممکن است احتیاج داشته باشیم تا تصمیم بگیریم آیا در یک شرکت سرمایه گذاری کنیم یا نه؟ در فوتبال یک بازی تهاجمی داشته باشیم یا نه و در هر دوی این مثال ها، نتایج به چیزهایی بستگی دارد که ما نمی توانیم آن ها را کنترل کنیم. در حالت اول موفقیت ما تا حد زیادی به اقتصاد آینده آن شرکت دارد. در حالت دوم بستگی به استراتژی دفاعی حریف دارد. ما موقعیت های اینچنینی را می توانیم با تئوری بازی مدل کنیم. ما شرایط گوناگون و امتیازات را در یک ماتریس نشان می دهیم و در نتیجه می توانیم بهترین استراتژی را از جبر ماتریس ها و یا برنامه ریزی خطی به دست آوریم.

۶-۱-۱) تئوری بازی چیست؟

تئوری بازی مطالعه حالت ستیز یا تعاون است. مفاهیم تئوری بازی وقتی اعمال می شوند که عملکرد عوامل مستقل از هم باشند. این عوامل ممکن است یک فرد، گروه، شرکت و یا ترکیبی از این ها باشد. مفاهیم تئوری بازی زبانی برای فرمول بندی، تحلیل و فهم سناریوهای استراتژیک هستند.

۶-۱-۲) تاریخچه و تأثیر تئوری بازی

ابتدایی ترین نمونه یک تحلیل فرمال از تئوری بازی مطالعه انحصار دونفره^۱ در سال ۱۸۳۸ توسط Antoine Cournot بود. ریاضی دانی به نام Emile Borel در سال ۱۹۲۱ یک تئوری درباره بازی ها ارائه کرد که در سال ۱۹۲۸ توسط John von Neumann تکامل یافت.

تئوری بازی پس از انتشار کتاب تئوری بازی ها و رفتار اقتصادی در سال ۱۹۴۴ توسط Von Neumann و اقتصاد دانی به نام Oskar Morgenstern به عنوان یک فیلد شناخته شد. این کتاب اصطلاحات اساسی و مسائل زیادی را پایه گذاری کرد که هم اکنون نیز استفاده می شوند.

در سال ۱۹۵۰ John Nash نشان داد که بازی های متناهی (کران دار) همیشه یک نقطه تعادل دارند که در آن ها تمام بازیکنان با دانستن حرکت حریفشان، حرکتی را انجام می دهند که برای آن ها بهترین امتیاز را دارد. این مفهوم پایه اصلی تحلیل بازی های رقابتی^۲ گردیده است. تئوری بازی در طی دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ از لحاظ تئوری گسترش یافت و به مسائل جنگی و سیاسی نیز اعمال گردید. از سال های ۱۹۷۰ باعث وقوع انقلابی در تئوری اقتصاد شد. بعدها کاربردهایی در فیزیولوژی، جامعه شناسی و بیولوژی پیدا کرد. با اعطای جایزه نوبل اقتصاد به John Harsanyi، Nash و Reinhard Selten تئوری بازی توجه زیادی را به خود معطوف کرد [۲۰].

انسجام و هماهنگی درونی و پایه های ریاضی تئوری بازی آن را به یک ابزار اولیه جهت مدل کردن و طراحی فرایندهای تصمیم گیری اتوماتیک در محیط های برهم کنشی تبدیل کرده است. به عنوان مثال ممکن است فردی دوست داشته باشد تا قوانین سودمندی را جهت مزایده یک وب سایت وضع نماید یا اوراق بهادار ضد تقلب اتوماتیک جهت خریداری پهنای باند ارتباطی داشته باشد. تحقیقات در زمینه چنین کاربردهایی موضوع مقالات کنفرانس های اخیر است. (برای مثال [۲۱]).

۶-۱-۳) انواع بازی ها

این تئوری چندین زیر شاخه دارد که برخی از تقسیم بندی های مهم آن به شرح زیر است:

۲- نفره و n نفره:

تئوری ۲ نفره مربوط است به انتخاب های استراتژیک ۲ بازیکن، در حالی که تئوری بازی n نفره ($n > 2$) بیشتر مربوط است به ائتلاف و یا زیر مجموعه های بدون تغییر از بازیکنان که امتیازات کسب شده به طور معقول بین آنها تقسیم می شود.

- مجموع صفر^۳ و غیر مجموع صفر^۴:

اگر جمع امتیازات یا پرداختی های داده شده به بازیکنان صفر باشد، بازی از نوع مجموع صفر می باشد. مثلاً در حالتی که ۲ نفر بازی می کنند و برنده به بازنده ۱۰۰ تومان می دهد، جمع پرداختی ها و دریافتی ها صفر است و بنابراین بازی از نوع مجموع صفر است. اگر در همین بازی برنده مبلغی از جایزه را به عنوان مالیات پرداخت نماید بازی از نوع غیر مجموع صفر خواهد بود.

- مشارکتی^۵ و رقابتی:

در بازی های مشارکتی بازیکنان می توانند توافقات اجرایی باهم داشته باشند، در حالی که نوع رقابتی اجازه ارتباط بین بازیکنان را نمی دهد. ولی فرض می شود که هر توافقی بین بازیکنان باید در حالت تعادل باشد. این برای بازیکن عقلانی است که در صورت عدم تخطی بازیکن مقابل از مقررات وضع شده، او نیز از مقررات تخطی نکند، چون در این صورت ضرر می کند.

۶-۲) واژه نامه

در این بخش برخی از واژه های مهم تئوری بازی به طور مختصر شرح داده می شوند.

- استنتاج پسرو^۶:

این تکنیک برای حل بازی با اطلاعات کامل استفاده می شود. ابتدا فرض می شود که بازیکن ها بازی را به آخر رسانده اند و سپس بهترین حرکت برای هر بازیکن تشخیص داده می شود. از این حرکت به

3- Zero-sum

4- Non-zero-sum

5- Cooperative

6- Backward induction

عنوان حرکت آینده موجود استفاده می شود. این فرایند به سمت عقب ادامه می یابد تا جاییکه به نقطه شروع برسیم.

- دانش عمومی^۷:

یک حقیقت دانش عمومی است اگر تمامی بازیکنان از آن اطلاع داشته باشند و بدانند که سایرین نیز از آن اطلاع دارند. معمولاً فرض می شود که بازی ها از این دسته اند.

- استراتژی غالب:

برای یک بازیکن یک استراتژی، استراتژی دیگر او را مغلوب می کند اگر امتیاز^۸ بهتری برایش داشته باشد (بدون توجه به این که بازیکن دیگر چه حرکتی انجام می دهد). به این استراتژی استراتژی غالب گفته می شود.

- بازی گسترده^۹:

یک بازی از نوع گسترده توسط نمودار درختی نمایش داده می شود. این نمودار ترتیب حرکات بازیکنان و اطلاعات هر بازیکن در نقاط تصمیم گیری را نشان می دهد.

- بازی:

یک بازی شرح رسمی یک موقعیت استراتژیک است.

- تئوری بازی:

تئوری بازی مطالعه رسمی یک موقعیت تصمیم گیری است وقتی که چندین بازیکن باید یک انتخاب داشته باشند و تصمیم گیری آن ها بر انتخاب بازیکنان دیگر تأثیر می گذارد.

7- Common knowledge

8- Payoff

9- Extensive game

- تعادل Nash^{۱۰}:

نقطه تعادل Nash که از آن به عنوان تعادل استراتژیک نیز یاد می شود، لیستی از استراتژی ها برای هر بازیکن است و دارای این خاصیت است که در آن هیچ بازیکنی به طور یکجانبه نمی تواند استراتژی خود را تغییر دهد و امتیاز بهتری را به دست آورد.

- امتیاز:

عددی است که utility نیز نامیده می شود و میزان درآمد بازیکن را نشان می دهد. وقتی که درآمد رندم باشد، امتیازها با توجه به احتمالشان وزن دهی می شوند. امتیاز با میزان ریسک بازیکن نیز متناسب است.

- اطلاعات کامل^{۱۱}:

یک بازی از نوع اطلاعات کامل است وقتی در هر لحظه از زمان تنها یک بازیکن حرکت انجام می دهد و از تمامی حرکات انجام شده تا آن لحظه از زمان اطلاع کامل دارد.

- بازیکنان:

بازیکن عاملی است که در بازی تصمیم می گیرد.

- خردمندی:

از یک بازیکن به عنوان خردمند یاد می شود وقتی که طوری حرکت می کند که امتیاز او حداکثر شود. معمولاً فرض می شود که خردمندی تمام بازیکنان دانش عمومی است.

- فرم استراتژیک^{۱۲}:

یک بازی فرم استراتژیک نمایش فشرده یک بازی است که در آن بازیکنان به طور آنی استراتژی-هایشان را انتخاب می کنند. امتیازهای حاصله در یک جدول نمایش داده می شوند که هر خانه ترکیب استراتژی ها را نشان می دهد.

10- Nash equilibrium

11- Perfect information

12- Strategic form

- استراتژی:

در یک بازی در فرم استراتژیک، استراتژی عبارت است از یکی از گزینه های پیش روی بازیکن برای حرکت. در بازی های گسترده یک استراتژی، نقشه و طرح کامل انتخاب هاست.

۶-۳) تعاریف و مثال ها

هدف مطالعه در تئوری بازی گیم است که یک مدل فرمال از یک موقعیت فعل و انفعالی می باشد. معمولاً یک بازی شامل چندین بازیکن است. به بازی که تنها یک بازیکن دارد، مساله تصمیم گیری^{۱۳} گفته می شود. تعریف فرمال بر بازیکنان، اولویت های آن ها، اطلاعات و حرکت های استراتژیک موجود آن ها و نیز تأثیر حرکت بازیکنان بر نحوه برنده شدنشان مبتنی می باشد. بازی ها با توجه به میزان جزئیاتی که ارائه می دهند تقسیم بندی می شوند. بازی ائتلافی یک توصیف سطح بالا است که مشخص می کند که هر گروه یا ائتلاف از تعاون بین اعضای خود چه امتیازهایی به دست می آورد. در این بازی روند تشکیل ائتلاف تشریح نمی شود. به عنوان مثال بازیکنان ممکن است چند حزب در یک پارلمان باشند. هر حزب با توجه به تعداد کرسی های خود در پارلمان دارای قدرت متفاوت از سایرین است. این نوع بازی شرح می دهد که چه ائتلاف هایی از احزاب می تواند اکثریت را تشکیل دهد ولی وارد جزئیات نمی شود.

تئوری بازی های مشارکتی، بازی های ائتلافی را با توجه به میزان نسبی قدرتی که بازیکنان در دست دارند یا این که چگونه یک ائتلاف موفق باید درآمد خود را تقسیم کند، بررسی می نماید. طبیعتاً این روش بیشتر به موقعیت های سیاسی یا روابط بین المللی که در آن قدرت خیلی مهم است اعمال می شود. به عنوان مثال Nash راه حلی برای تقسیم درآمدهای حاصل از توافق در یک مسأله چانه زنی که تنها به قدرت نسبی دو طرف بستگی دارد ارائه داد.

در مقابل تئوری بازی رقابتی با تحلیل استراتژیک انتخاب ها متناسب است. اساس بازی رقابتی این است که جزئیات دستورات و زمان بندی انتخاب بازیکنان یک امر حیاتی برای تشخیص غلبه در بازی است. اصطلاح رقابتی به آن معنی است که این مدل از تئوری بازی، انتخاب بازیکنان را صریحاً بدون توجه به علائق آن ها مدل می کند. در نوع رقابتی وقتی که بازیکنان بخواهند، تعاون می تواند اتفاق بیفتد.

انشعابات تئوری بازی به خاطر فرضیات موجود در آن ها تفاوت دارند. فرض عمده در بسیاری از شاخه های تئوری بازی این است که بازیکنان خردمند هستند. یک بازیکن خردمند کسی است که همیشه حرکتی را که برای او پیروزی به ارمغان می آورد انتخاب می کند. هدف تئوری بازی در این شاخه ها این است که پیش بینی نماید که چگونه بازی باید توسط بازیکنان خردمند اداره شود و یا این که چگونه باید در مقابل یک بازیکن خردمند بهترین بازی را ارائه دهیم.

۶-۳-۱) فرم های استراتژیک و گسترده

فرم استراتژیک نوع اساسی از بازی است که در تئوری بازی رقابتی مطالعه می شود. یک بازی در فرم استراتژیک استراتژی ها و غلبه های هر بازیکن را که از ترکیب هریک از انتخاب ها ناشی می شود لیست می کند. هر غلبه توسط یک امتیاز جداگانه برای هر بازیکن نمایش داده می شود که یک عدد است.

فرم گسترده (یا درختی) بیشتر از فرم استراتژیک بازی به جزئیات می پردازد. این توصیف یک شرح کامل از روند بازی در طول زمان ارائه می دهد. یک فرم گسترده می تواند به طور مستقیم تحلیل شود و یا به فرم استراتژیک تبدیل شده و سپس تحلیل گردد.

مثال هایی که در آینده می آیند شرحی از این دو فرم بیان بازی ارائه می دهند.

۶-۳-۲) چیرگی^{۱۴}

از آنجاییکه فرض می شود تمامی بازیکنان خردمند هستند، آن ها با دانستن حرکات حریفانشان حرکتی را بر می گیرند که احتمال پیروزی را برایشان زیاد نماید.

فرض می شود که یک بازیکن ۲ استراتژی A و B را داشته باشد، به طوریکه با دانستن استراتژی های حریف، استراتژی A بهتر مساوی استراتژی B باشد. در این حالت گفته می شود که استراتژی A بر استراتژی B غلبه می کند. یک بازیکن خردمند هیچ گاه استراتژی مغلوب را انتخاب نمی نماید. به مثال های زیر توجه نمایید.

مثال ۱) معمای زندانی^{۱۵}

بازی معمای زندانی، یک بازی در فرم استراتژیک بین ۲ بازیکن است. هر بازیکن ۲ استراتژی دارد که همکاری^{۱۶} و فرار^{۱۷} هستند و با حرف های C و D برای بازیکن I و c و d برای بازیکن II تعیین می گردند.

شکل ۶-۱ امتیاز های حاصله در این بازی رانشان می دهد. بازیکن I سطرها را بر می گیرند که C یا D هستند و بازیکن II ستون ها را که c و d می باشند.

14- Dominance
15- Prisoner's Dilemma
16- Cooperate
17- Defect

		II	
		<i>c</i>	<i>d</i>
I	<i>C</i>	2	3
	<i>D</i>	0	1
		2	0
		3	1

شکل (۱-۶) ماتریس امتیازات بازی معمولی زندانی

ترکیب استراتژی های (C,c) ، امتیاز برابر با ۲ را برای هر دو بازیکن دارد. همین طور ترکیب (D,d) ، امتیاز ۱ را. ترکیب (C,d) برای بازیکن I، امتیاز صفر و برای بازیکن II، ۳ می دهد. و در نهایت در ترکیب (D,c) بازیکن I، ۳ و بازیکن II صفر به دست می آورد.

مثال زده شده از نوع بازی متقارن است. تقارن به این معنی که اگر جای ۲ بازیکن عوض شود بازی تغییری نمی کند. خط چین در شکل ۲-۶ بیانگر این موضوع است. توجه داشته باشید که از آنجایی که بازیکنان به طور آنی (یعنی بدون دانستن حرکت حریف مقابل) حرکت می کنند، در فرم استراتژیک ترتیبی بین بازیکن I و II وجود ندارد.

		II	
		<i>c</i>	<i>d</i>
I	<i>C</i>	2	3
	<i>D</i>	0	1
		2	0
		3	1

شکل (۲-۶) ماتریس امتیازات با نمایش تقارن. خط چین تقارن بازی را خاطر نشان می کند. پیکان های سمت چپ و راست استراتژی مورد علاقه بازیکن I را هنگامی که بازیکن II ستون چپ یا راست را بازی می کند نشان می دهند. به طور مشابه پیکان های بالا و پایین جدول استراتژی مورد علاقه بازیکن II را هنگامی که بازیکن I ردیف بالا یا پایین را بازی می کند، نشان می دهند.

در بازی معمای زندانی، استراتژی فرار استراتژی همکاری را مغلوب می کند. پیکان های سمت چپ و راست شکل ۶-۲ این امر را آشکار می کنند.

داستان معمای زندانی از این قرار است که ۲ زندانی در مورد یک جنایت وخیم مورد سوء ظن هستند. مدرک دادگاه پسندی در مورد این جنایت وجود ندارد مگر این که یکی از زندانی ها علیه دیگری شهادت دهد. اگر یکی شهادت دهد، از اتهام مصون خواهد ماند (امتیاز ۳) در حالی که دیگری به مدت زمان زیادی به زندان محکوم می شود (امتیاز ۰). اگر هر دوی آن ها شهادت دهند، مجازاتشان کمتر می شود (امتیاز ۱ برای هر کدام). اگر باهم همکاری کنند (مشارکتی) و اصلاً شهادت ندهند، تنها به مدت کوتاهی زندانی می شوند (امتیاز ۲ برای هر یک). راه فرار از این حالت که سود دو طرف را دارد شهادت دادن است که امتیاز بیشتری را نصیب شخص می نماید. این که حریف مقابل چکار می کند مهم نیست. به این ترتیب ۲ راهی آن ها ادامه می یابد.

مثال ۲) انتخاب کیفیت

با مثال دیگری از یک بازی نشان می دهیم که چگونه اصل حذف استراتژی مغلوب می تواند اعمال گردد. فرض کنیم بازیکن I یک ارائه دهنده سرویس اینترنت و بازیکن II یک مشتری است. آن ها در حال عقد قرارداد برای یک بازه زمانی هستند.

ارائه دهنده سرویس می تواند بین دو استراتژی ارائه با کیفیت بالا (high) و پایین (low) تصمیم بگیرد. سرویس high هزینه زیادی را می طلبد و سطح کیفیت نیز در قرارداد ذکر نمی شود. کیفیت high خیلی بهتر از low است، طوری که اگر مشتری بداند که سطح کیفیت low است آن را نمی خرد. انتخاب مشتری ۲ تاست: buy یا don't buy. شکل ۶-۳ ماتریس امتیازات را که تشریح کننده این موقعیت استراتژیک است، نشان می دهد.

		II			
		buy ← don't buy			
I	High	2	1	↓	
	2	0			
Low	0	1	↓		
	3	1			
		→			

شکل (۳-۶) ماتریس امتیازات بازی انتخاب کیفیت

مشتری در صورتی که بازیکن I سرویس با کیفیت بالا فراهم نماید، ترجیح می دهد تا خرید کند و گرنه اقدام به خرید نخواهد نمود. همچنین ارائه دهنده بدون توجه به نظر مشتری همیشه ترجیح می دهد تا سرویس با کیفیت پایین را ارائه نماید. بنابراین برای بازیکن I، استراتژی low بر استراتژی high غلبه می نماید.

حال از آنجایی که بازیکن II خردمندی بازیکن I را باور دارد، می داند که او همیشه کیفیت low را ترجیح خواهد داد. بنابراین او از ارائه دهنده یک سرویس با کیفیت پایین را انتظار دارد. بنابراین او ترجیح می دهد که خرید ننماید (امتیاز ۱) تا این که بخرد (امتیاز ۰) بنابراین خردمندی بازیکن II منجر به این می شود که ارائه دهنده یک سرویس با کیفیت پایین ارائه نماید و قرارداد امضا نمی شود. این بازی خیلی شبیه به بازی معمای زندانی در شکل ۱-۶ می باشد. در حقیقت تنها تفاوت بین این دو امتیاز برابر با ۱ (به جای ۳) برای بازیکن II در بخش راست بالای جدول است. این باعث می شود تا فلش بالای جدول از سمت راست به سمت چپ برگردد و انتخاب بازیکن II به بازیکن I وابسته باشد (بازی دیگر متقارن نیست). بازیکن II یک استراتژی غالب ندارد. به هر حال بازیکن I هنوز چنین استراتژی را دارد که باعث برد او شود. این امر از جهت فلش های چپ و راست جدول مشخص است. راه دیگر برای رسیدن به این غلبه حذف استراتژی های مغلوب است. High برای بازیکن I حذف می شود و در بازی منتهی که بازیکن I تنها یک استراتژی low را دارد استراتژی buy نیز برای بازیکن II حذف می گردد.

همانند بازی معمای زندانی، استراتژی غالب از نظر عقلانی متفاوت با واقعیت است. این استراتژی (high, buy) است. جایی که سرویس با کیفیت بالا فراهم می شود و مشتری قرارداد را امضا می نماید. به هر حال این غلبه قابل اعتماد نیست، چون ارائه دهنده تلاش خواهد کرد تا کارشکنی کرده و سرویس با کیفیت پایین را ارائه نماید.

۳-۳-۶ تعادل Nash

در مثال های قبلی ملاحظه استراتژی های غالب به تنهایی موجب شد تا بازیکنان به دقت چگونگی بازی را فراگیرند. در بسیاری از بازی ها به هر حال استراتژی های مغلوب وجود ندارند. و بنابراین این ملاحظات کافی نیستند تا بتوان برای چگونه بازی کردن بازیکنان روشی را پیشنهاد نمود. مفهوم اصلی تعادل Nash خیلی عمومی است. یک تعادل Nash استراتژی را برای هر بازیکن تجویز می نماید که بازیکن به طور یکجانبه نمی تواند آن را تغییر دهد، در صورتی که بازیکن های دیگر از این استراتژی تجویز شده پیروی نمایند. از آنجایی که بازیکنان دیگر نیز خردمند هستند، برای هر بازیکن معقول این است که حریفانش انتظار تخلف از استراتژی مورد نظر را نداشته باشد.

مثال ۳) بازی انتخاب کیفیت بازننگری شده

در بازی کیفیت شکل ۳-۶، به عنوان مثال افزایش میزان بهره مندی مشتری از سرویس high، هیچ اثری در تعادل نهایی ندارد مگر این که ارائه دهنده انگیزه ای برای آن سرویس داشته باشد. بنابراین فرض می کنیم که بازی با افزودن یک تبصره به قرارداد تغییر یابد. به این صورت که وقتی مشتری کیفیت پایین را ببیند از امضای قرارداد خودداری نماید.

بازی منتهی در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. اینجا فراهم نمودن سرویس با کیفیت low، حتی اگر مشتری تصمیم به خرید داشته باشد، امتیاز یکسان ۱ را که مقدارش کم است برای ارائه دهنده به

همراه خواهد داشت. چون اگر خرید نماید طبق ماده ای که به قرارداد افزوده خواهد شد جنس را پس خواهد داد.

		II	
		buy ←	don't buy
I	High	2, 2	1, 0
	Low	0, 1	1, 1

↑ ↓

→

شکل (۴-۶) بازی انتخاب کیفیت با تبصره فسخ قرارداد برای مشتری. پیکان سمت چپ نشان می دهد که وقتی بازیکن

buy II را انتخاب می کند، بازیکن I high را ترجیح می دهد.

امتیاز عوض شده برای بازیکن II باعث می شود تا جهت پیکان سمت چپ به سمت بالا برگردد. دقت داشته باشید که در مقایسه با شکل ۳-۶ تنها امتیاز متعلق به ارائه دهنده تغییر کرده است. این بازی استراتژی مغلوبی برای هیچ یک از بازیکنان ندارد. پیکان های اطراف جدول جهت های مختلفی دارند. بازی ۲ تعادل Nash دارد که در آن ها هر بازیکن با قطعیت استراتژی اش را انتخاب می نماید. یکی از آن ها مانند حالت قبل ترکیب استراتژی (low, don't buy) است. این یک تعادل است چون low بهترین پاسخ به don't buy است و بالعکس.

تعادل Nash دوم ترکیب استراتژی (high, buy) است. این یک تعادل است چون بازیکن I ترجیح می دهد تا وقتی مشتری خرید می کند، سرویس با کیفیت بالا را فراهم کند و بالعکس بازیکن II وقتی که کیفیت بالاست ترجیح می دهد تا خرید کند. این تعادل نسبت به اولی ارجح تر است چون امتیاز بیشتری برای هر ۲ بازیکن دارد.

هر کدام از ۲ نقطه تعادل Nash توصیه های منطقی برای ۲ بازیکن در مورد این که چگونه بازی کنند هستند. هر گاه یکی از بازیکنان در استراتژی هایی که یک تعادل Nash را تشکیل می دهند مستقر شوند، هیچ بازیکنی اشتیاق انحراف از آن را ندارد. بنابراین از لحاظ عقلی آن ها روی استراتژی شان

پافشاری خواهند نمود. این موجب می شود تا تعادل Nash به عنوان یک راه حل دارای ثبات در مفهوم تئوری بازی مطرح باشد. در مقابل ترکیب استراتژی که یک تعادل Nash نیست یک راه حل قابل اعتماد نمی باشد چون حداقل یکی از بازیکنان سعی خواهد نمود تا استراتژی خود را عوض کند و امتیاز بیشتری برای خودش به دست آورد.

همانطور که این مثال نشان می دهد، یک تعادل Nash ممکن است یکتا نباشد. در بازی معمای زندانی و انتخاب کیفیت شکل ۳-۶ یک تعادل Nash وجود داشت. یک استراتژی مغلوب هرگز نمی تواند جزوی از یک تعادل Nash باشد چون یک بازیکن در آینده می تواند به جای استراتژی مغلوب، استراتژی غالب را انتخاب نماید و امتیاز بیشتری را به دست آورد. بنابر این اگر حذف استراتژی های مغلوب منجر به یک ترکیب استراتژی یکه گردد، این ترکیب یک تعادل Nash است. بازی های بزرگ تر نیز ممکن است یک نقطه تعادل Nash داشته باشند که از روش غلبه به دست نیاید.

۴-۳-۶) انتخاب تعادل

اگر یک بازی بیشتر از یک تعادل Nash داشته باشد تئوری برهم کنش استراتژیک باید بتواند بازیکنان را به سمت خردمندانه ترین تعادل هدایت کند. در تئوری بازی ها مقالات زیادی در این زمینه نوشته شده اند تا تعادل برتر را نشان دهند. به عنوان نمونه در مثال شکل ۴-۶ (high, buy) برای هر دو بازیکن بهتر از استراتژی دیگر است.

یک بازی ممکن است به گونه دیگر تفسیر شود طوری که تعادل Nash قبلی که مورد علاقه نبود مورد توجه قرار بگیرد. به عنوان مثال یک سناریو از بازی شکل ۴-۶ را در نظر بگیرید. دو شرکت می خواهند در یک ساختار زیر بنایی سرمایه گذاری کنند. آن ها قصد دارند توسط آن ساختار با یکدیگر ارتباط برقرار کنند ولی به طور مستقل در مورد آن چیزی که می خرند تصمیم می گیرند. هر شرکت می تواند بین تجهیزات با پهنای باند low و high یکی را انتخاب نماید. (در این حالت برای هر دو

بازیکن استراتژی های با نام یکسان استفاده خواهد شد). برای بازیکن II، high و low جایگزین buy و don't buy در شکل ۴-۶ می شوند. باقی بازی یکسان است. امتیازهای (تغییر نکرده) بازیکن I چنین تفسیری دارند (که به خاطر تقارن برای بازیکن II نیز اعمال می شوند). یک اتصال با پهنای باند پایین بدون توجه به آنکه طرف مقابل دارای چه پهنای باندی است به خوبی کار می کند (امتیاز ۱). به هر حال سوئیچ از حالت low به high تنها در صورتی خوشایند است که طرف مقابل پهنای باند بالا داشته باشد (امتیاز ۲) در غیر این صورت فرد دچار هزینه اضافی شده است (امتیاز ۰).

همانند بازی کیفیت، تعادل (low, low) کم ارزش تر از تعادل دیگر می باشد. البته کاملاً هم بد نیست. به علاوه از استراتژی low به عنوان استراتژی max-min نیز یاد می شود چون مینیمم امتیازی را که بازیکن می تواند در هر حالت می تواند به دست آورد ماکزیمم می کند. از نظر مفهومی سرمایه گذاری روی تجهیزات با پهنای باند پایین به تنهایی یک انتخاب سالم است. به علاوه این استراتژی جزوی از یک تعادل است و منطقی است که بازیکن از حریفش نیز انتظار حرکت مشابه را داشته باشد.

۵-۳-۶ بازی های تکاملی^{۱۸}

بازی انتخاب پهنای باند وقتی که به یک جمعیت بزرگ از بازیکنان یکسان اعمال شود می تواند به گونه ای دیگر تحلیل شود. شکل ۵-۶ بازی انتخاب پهنای باند را نشان می دهد که در آن بازیکن ۲ استراتژی low و high را دارد. امتیاز مثبت ۵ برای هر بازیکن در ترکیب استراتژی (high, high) این ترکیب را خواستنی تر از تعادل دیگر می کند.

		II High ← Low	
I	High	5 1	↓
	Low	0 1	
		↑	
		High	
		Low	
		→	

شکل (۵-۶) بازی انتخاب پهنای باند

در توصیف تکاملی، یک جمعیت بزرگ از افراد وجود دارد که هرکدام می توانند یکی از این استراتژی-ها را اتخاذ نمایند. در این حالت بازی امتیاز ۲ تا از این بازیکنان را وقتی که باهم روبرو می باشند نشان می دهد. دینامیک این بازی براین فرض استوار است که هر استراتژی توسط گروه خاصی از افراد اتخاذ می شود. سپس با داشتن توزیع این استراتژی ها افراد با امتیاز متوسط بهتر، موفق تر از سایرین خواهند بود. بنابراین نسبت جمعیت آن ها در جمعیت کل طی زمان افزایش می یابد. این به نوبه خود روی این که کدام استراتژی بهتر می باشد ممکن است تأثیر بگذارد. در بسیاری از حالات در بازی های متقارن با تنها ۲ استراتژی این پروسه دینامیکی منجر به تعادل می شود.

در مثال شکل ۵-۶ بخش خاصی از کاربران متصل به یک شبکه تجهیزات با پهنای باند بالا یا پایین خواهند داشت. به عنوان مثال فرض کنید که یک چهارم کاربران تجهیزات پهنای باند بالا و سه چهارمشان تجهیزات با پهنای باند پایین را انتخاب نمایند. مفید خواهد بود اگر این امر را به صورت درصدهایی به ستون ها که نشان دهنده استراتژی های بازیکن II است نسبت دهیم. یک کاربر جدید به عنوان بازیکن I که می خواهد بین high و low تصمیم گیری نماید، امتیاز او بستگی به تقسیم بندی های ذکر شده دارد. اگر بازیکن I، high را انتخاب نماید، $\frac{1}{4} \times 5 + \frac{3}{4} \times 0 = 1.25$ و اگر low را انتخاب نماید $\frac{1}{4} \times 1 + \frac{3}{4} \times 1 = 1$ امتیاز او خواهد بود. با داشتن این دو امتیاز مشخص است که اگر بازیکن به کاربران با پهنای باند high بپیوندد برایش بهتر است. بنابراین او نیز به این بخش از جمعیت اضافه می شود. در نتیجه در طی زمان هر بازیکنی که وارد بازی می شود پهنای باند high را انتخاب

می نماید و در نهایت منجر به این می شود که تمام بازیکنان استراتژی (high, high) را برگزینند. اگر آرایش جمعیت اولیه طوری بود که بازیکن تازه وارد به سمت low گرایش پیدا می کرد، برعکس حالت قبل جمعیت نهایی (low, low) را انتخاب می کردند.

۶-۳-۶) مثال ها و مفاهیم متفرقه

مثال ۴)

در اینجا قوانین یک بازی ساده بی طرف^{۱۹} ترکیبی برای آشنایی بیشتر با تئوری بازی معرفی می شود.

- ۱) ۲ بازیکن به نام های ۱ و ۲ وجود دارند.
 - ۲) ۲۱ مهره در مرکز میز قرار دارند.
 - ۳) هر حرکت شامل برداشتن یک یا دو یا سه مهره از مجموعه می باشد. در هر حرکت حداقل ۱ و حداکثر ۳ مهره باید برداشته شود.
 - ۴) بازی را بازیکن ۱ شروع کرده و بازیکن ۲ ادامه می دهد. این روند ادامه می یابد.
 - ۵) بازیکنی که آخرین حرکت را انجام دهد برنده است.
- حال چگونه می توان این بازی را تحلیل نمود؟ آیا یکی از بازیکنان می تواند استراتژی اتخاذ کند تا برنده شود؟ بازیکنی که می خواهد اول شود بهتر است ابتدا شروع کند یا نه؟ بهترین استراتژی کدام است؟ ما این بازی را از انتها به آغاز تحلیل می کنیم. از این روش گاهی به عنوان استنتاج پسرو یاد می شود.

اگر در آخر بازی فقط یک یا دو یا سه مهره وجود داشته باشد، بازیکنی که آخرین حرکت را انجام می دهد می تواند با برداشتن تمام مهره ها برنده بازی شود. حال فرض کنید که ۴ مهره باقی مانده باشد، بازیکنی که نوبت اوست مجبور است حداقل ۱ و حداکثر ۳ مهره باقی بگذارد و رقیب او می تواند برنده

شود. پس موقعیت ۴ مهره برای کسی که حرکت را قبلاً انجام داده موقعیت برد و برای کسی که نوبت اوست، موقعیت باخت است. اگر ۵،۶ یا ۷ مهره باقی مانده باشد، بازیکنی که حرکت بعدی را انجام می دهد می تواند با تغییر موقعیت به ۴ مهره (برداشتن ۱ مهره در ۵ تایی، ۲ مهره در ۶ تایی و ۳ مهره در ۷ تایی) بازی را به نفع خود کند. اگر ۸ مهره باقی مانده باشد، بازیکنی که نوبت اوست مجبور است با برداشتن حداقل ۱ و حداکثر ۳ مهره به موقعیت ۵،۶ یا ۷ تایی برود و در نتیجه طبق بحث قبلی بازیکن بعدی می تواند برنده شود.

همانطور که مشاهده می شود، موقعیت های با ۰، ۴، ۸، ۱۲ و ... مهره، موقعیت های هدف هستند که ما دوست داریم برای برنده شدن بازی را به آن سمت بکشانیم. با این توصیف به سراغ تحلیل ۲۱ مهره می رویم. ۲۱ بر ۲ قابل قسمت نیست. اولین بازیکن می تواند با برداشتن تنها یک مهره، بازی را به ۲۰ مهره تبدیل نماید و برنده شود.

- بازی ترکیبی چیست؟

حال بازی ترکیبی را با دقت بیشتری تحلیل می نماییم. بازی ترکیبی باید شرایط زیر را برآورده سازد:

- (۱) تعداد بازیکنان ۲ تاست.
- (۲) مجموعه ای از موقعیت های ممکن (معمولاً محدود) در بازی وجود دارند.
- (۳) قوانین بازی برای هر دو بازیکن هستند و حرکت از هر موقعیت به دیگری یک حرکت قانونی است. اگر قوانین فرقی بین ۲ بازیکن نگذارد، یعنی در هر موقعیت شرایط برای ۲ بازیکن برای حرکت یکسان باشد از نوع بی طرف و در غیر این صورت از نوع یک طرفه^{۲۰} است.
- (۴) بازیکنان بازی را به نوبت ادامه می دهند.

(۵) بازی وقتی تمام می شود که به موقعیتی می رسد که دیگر هیچ حرکتی برای بازیکنی که نوبت اوست قابل انجام نباشد. اگر بازی هرگز تمام نشود به تساوی کشیده می شود. به هر حال ما با گذاشتن شرط پایان کاری می کنیم که بازی به تساوی کشیده نشود.

(۶) بازی پس از تعداد حرکات محدود به پایان می رسد. همانطور که قبلاً گفته شد در این نوع بازی هیچ حرکتی شانسی نیست. مثلاً نمی توان حرکتی را با انداختن تاس انجام داد.

– موقعیت های P و N:

در بازی که شرح آن داده شد، دیدیم که ۱۶،۱۲،۸،۴،۰ و ... موقعیت هایی هستند که بازیکن قبلی^{۲۱} در آن ها برنده می شود و سایر موقعیت ها یعنی ۱۱،۱۰،۹،۷،۶،۵،۳،۲،۱ موقعیت هایی هستند که بازیکن بعدی که نوبت اوست^{۲۲} در آن ها برنده می شود. بنابر به ۱۶،۱۲،۸،۴،۰ و ... موقعیت های P و به ۱۱،۱۰،۹،۷،۶،۵،۳،۲،۱ و ... موقعیت های N گویند.

مثال (۵) بازی سنگ-کاغذ-قیچی

احتمالاً شما بازی ساده سنگ-کاغذ-قیچی^{۲۳} را انجام داده اید. در این بازی ۲ بازیکن A و B وجود دارند که در هر نوبت با حرکت دست سنگ، کاغذ یا قیچی را نمایش می دهند. سنگ قیچی را شکست می دهد (از آنجاییکه سنگ قیچی را می شکند) ولی از کاغذ شکست می خورد (چون کاغذ می تواند دور سنگ پیچیده شود). قیچی هم کاغذ را شکست می دهد (چون قیچی

21- Previous Player

22- Next Player

23-“Paper, Scissors, Rock”

کاغذ را می برد). اگر هر دو شخص A و B حرکت مشابهی را انجام دهند، بازی تکرار می شود. فرض می شود در هر بازی برنده ۱ امتیاز از بازنده می گیرد.

سنگ-کاغذ-قیچی مثالی از بازی ۲ نفره مجموع صفر است، چون هرچقدر بازنده از دست می دهد، برنده همان مقدار به دست می آورد. بازی را با ماتریس امتیازات نشان می دهیم.

$$\begin{array}{c} \mathbf{B} \\ \begin{array}{c} p \quad s \quad r \\ p \left[\begin{array}{ccc} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{array} \right] \\ s \\ r \end{array} \\ \mathbf{A} \end{array}$$

در این ماتریس شرایط A در سمت چپ و شرایط مربوط به B در بالا آمده است. در ردیف ها برای A، اعداد مثبت نشان دهنده برد و اعداد منفی نشان دهنده از دست دادن و باخت است. برای B در ستون ها شرایط عکس این قضیه است. بنابر این به عنوان مثال در حالتی که A حرکت قیچی و B حرکت سنگ را انجام دهد، A یک امتیاز را از دست می دهد و B یک امتیاز را به دست می آورد که ۱- در ردیف دوم و ستون سوم نشان دهنده این امر است. در هر دور از بازی، انتخاب هر بازیکن استراتژی نامیده می شود. بنابراین اگر A، p را انتخاب کند، این معنی را می دهد که ردیف p استراتژی اوست.

فرض کنید که ۲ بازیکن A و B تصمیم به تغییر قوانین بازی سنگ-کاغذ-قیچی گرفته اند و ماتریس امتیازات به صورت زیر شده است:

$$\begin{array}{c} \mathbf{B} \\ \begin{array}{c} p \quad s \quad r \\ p \left[\begin{array}{ccc} -2 & -3 & 4 \\ 1 & -1 & 3 \\ 3 & 3 & 0 \end{array} \right] \\ s \\ r \end{array} \\ \mathbf{A} \end{array}$$

اگر بازیکن B نتواند استراتژی مناسبی از بین قیچی (s) و کاغذ انتخاب نماید، شما چه پیشنهادی به او می کنید؟

حل) در ابتدا به خاطر می آوریم که B ستون ها را بازی می کند. از آنجایی که ما کاغذ و قیچی را مقایسه می کنیم، ستون های s و p را نگاه می کنیم. B علاقه دارد تا امتیازات از دست رفته اش حداقل باشد (برای B علامت مثبت بیانگر از دست دادن امتیاز است و بالعکس) یعنی در این دو ستون n بهتر از m است اگر $n < m$ باشد. با مقایسه ستون های p و s می بینیم که تمامی اعداد ستون s کمتر مساوی ستون p هستند. بنابر این برای B بهتر است تا صرف نظر از انتخاب A استراتژی s را انتخاب کند.

ما می گوئیم که ستون s، ستون p را مغلوب می کند (یا ستون p توسط ستون s مغلوب می شود)، چون ستون s کمتر مساوی ستون p است. اگر شما بازیکن B بودید، بهتر بود تا اصلاً استراتژی p را به کار نمی بردید، چون s از آن بهتر یا مساوی است. بنابراین می توان ماتریس را با حذف ستون هایی که توسط سایر ستون ها مغلوب می شوند ساده تر نمود. بنابر این ماتریس امتیازات به صورت زیر در می آید:

$$\begin{array}{c} \mathbf{B} \\ \begin{array}{cc} s & r \end{array} \\ \mathbf{A} \begin{array}{c} p \\ s \\ r \end{array} \left[\begin{array}{cc} -3 & 4 \\ -1 & 3 \\ 3 & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

دقت شود که ستون r نه توسط ستون s و نه توسط ستون p مغلوب می شود، بنابراین حذف نشد. در مورد بازیکن A چگونه؟ از آنجاییکه A ردیف ها را بازی می کند، باید ببینیم که کدام یک از ردیف ها دیگری را مغلوب می کند. با دقت در ردیف های ماتریس ساده شده مشاهده می شود که هیچ یک از ردیف های ماتریس دیگری را مغلوب نمی کند بنابراین ماتریس از این ساده تر نمی شود.

۶-۴) بهینه سازی با استفاده از مفاهیم تئوری بازی

۶-۴-۱) بازی های مشارکتی: Pareto-front

در مساله می نیمم سازی ۲ تابع هدف f_A و f_B ، ما فضای متغیرهای $(x, y) \in A \times B$ را به عنوان مجموعه استراتژی های معقول تعریف می کنیم. در حقیقت اگر ما A و B را به عنوان دو بازیکن فرض کنیم، هر جفت (x, y) یک ترکیب استراتژی خواهد بود که توسط دو بازیکن بازی می شود.

Pareto-front ممکن است به عنوان نتیجه بازی مشارکتی دیده شود که در آن ۲ بازیکن A و B سعی در می نیمم کردن هر دو تابع هدف را دارند. در این حالت یک جواب تنها پیدا نمی شود، بلکه مجموعه ای از جواب ها یافت می شوند که از آن ها تحت عنوان Pareto-front یاد می شود. این حقیقت از آن جا ناشی می شود که نقطه یکتایی وجود ندارد که در آن هر دو تابع برازندگی بهتری نسبت به تمام نقاط دیگر داشته باشند. بیان ریاضی Pareto-front به این صورت است:

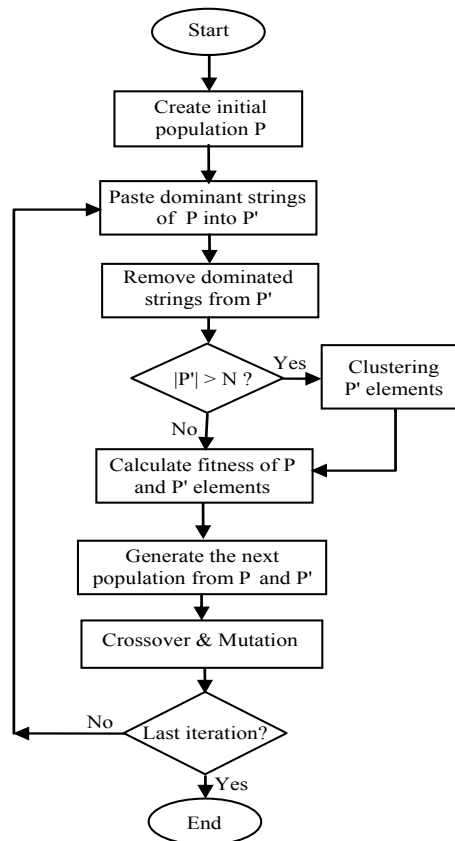
$(\bar{x}, \bar{y}) \in A \times B$ عضوی از Pareto-front است اگر و تنها اگر هیچ $(x, y) \in A \times B$ وجود نداشته باشد که هر دو شرط زیر را برآورده نماید:

$$\begin{cases} f_A(x, y) \leq f_A(\bar{x}, \bar{y}) \\ f_B(x, y) \leq f_B(\bar{x}, \bar{y}) \end{cases}$$

روش های زیادی برای یافتن Pareto-front یا به طور دقیق تر Pareto-optimal front وجود دارند. در اینجا ما تنها به شرح ۲ الگوریتم مشهور بسنده می کنیم.

۶-۴-۱-۱) SPEA²⁴

مقاله [۸] یک روش بهینه سازی چند هدفه جدید به نام روش تکاملی Strength Pareto را معرفی می کند. روش SPEA مخلوطی از تکنیک های قدیمی و جدید را جهت یافتن راه حل های بهینه Pareto استفاده می کند. الگوریتم روش مزبور شامل گام های زیر است:



شکل (۶-۶) فلوچارت روش SPEA [۸]

- ۱- ایجاد جمعیت اولیه P به صورت رندم و مجموعه غالب تهی P' .
- ۲- کپی اعضای غالب P به P' .
- ۳- حذف عناصر تکراری و همچنین عناصری که توسط سایرین مغلوب می شوند از مجموعه P' .
- ۴- اگر تعداد اعضای P' از N' (که سایز P' است) بیشتر شد، توسط روش دسته بندی سائزش کاهش می یابد.
- ۵- محاسبه برازندگی^{۲۵} تمام اعضای P و P' .
- ۶- انتخاب N عضو از مجموعه $P + P'$ به روش binary tournament.
- ۷- اعمال crossover و جهش به این جمعیت و ایجاد جمعیت جدید P .
- ۸- در صورت رسیدن به شرط خاتمه، پایان وگرنه تکرار از مرحله ۲.

شکل ۶-۶ الگوریتم SPEA را به صورت فلوچارت نشان می دهد.

در ادامه این مقاله روش اختصاص برازندگی و دسته بندی شرح داده شده است:

الف) اختصاص برازندگی:

گام ۱) به هر عضو i از P' ($i \in P'$) یک عدد حقیقی S_i که $S_i \in [0,1]$ نسبت داده می شود. به این عدد

strength گفته می شود. اگر n تعداد اعضای P باشد که توسط عضو i ام P' مغلوب می شوند و N

سایز P باشد، $S_i = \frac{n}{N+1}$ خواهد بود. و در نهایت مقدار برازندگی عنصر i ام برابر است با: $f_i = S_i$.

گام ۲) مقدار برازندگی هر عضو از P ($j \in P$) برابر خواهد بود با جمع strengthهای اعضای P' از P' که

آن عضو را مغلوب می نمایند. در نهایت هر کدام از برازندگی های اعضای P را با عدد ۱ جمع

می کنیم تا مطمئن شویم برازندگی بیشتری نسبت به اعضای P' دارند (در اینجا فرض می شود که

اعضای P با برازندگی کمتر در جمعیت جدید بیشتر انتخاب می شوند).

$$f_j = 1 + \sum_{i, i \geq j} S_i \quad \text{where } f_j \in [1, N)$$

شکل ۶-۷ به فهم بیشتر این روش کمک زیادی می کند. فضای هدف که توسط ۳ تا از نقاط غالب

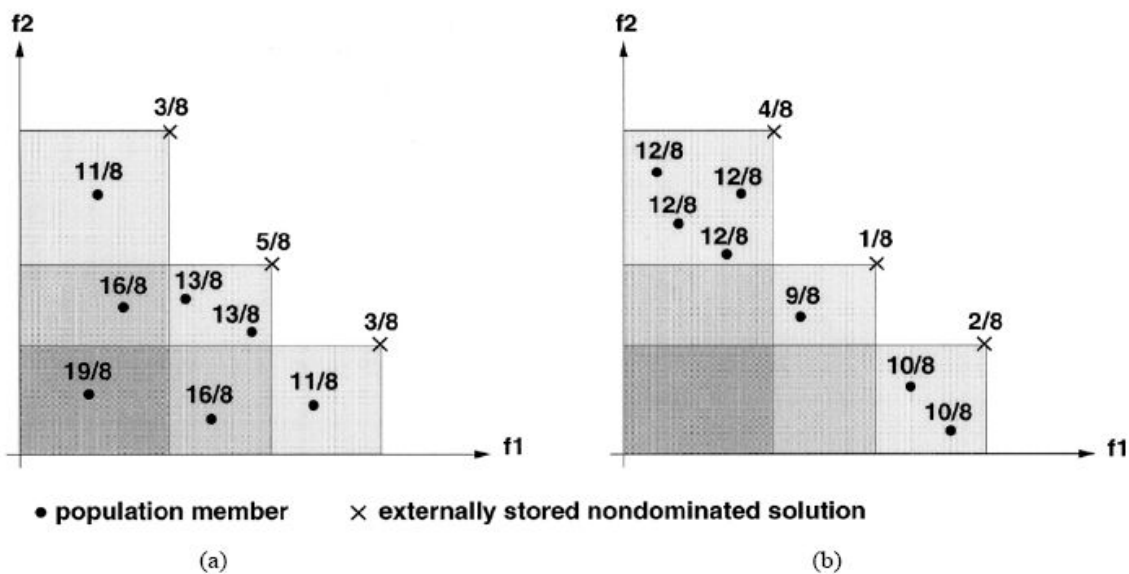
(غیر مغلوب) پوشش داده می شود، به سه مستطیل تقسیم می شود. همانطوری که از این شکل

پیداست تیره ترین مستطیل منطقه ای را نشان می دهد که توسط هر سه نقطه مغلوب می شود.

روشن ترین مستطیل تنها توسط یکی از ۳ نقطه غالب، مغلوب می گردد.

مکانیزم رتبه بندی در روش مزبور بیانگر این واقعیت است که نقاط نزدیک به Pareto-optimal front

خواستنی تر هستند.



شکل (۶-۷) مکانیزم اختصاص برازندگی [۸]

شکل a بیانگر این واقعیت است که نقاط واقع شده در مناطق با رنگ روشن تر برازندگی بهتری دارند و شکل b اصل strength را نشان می دهد که با توجه به آن نقاط غالبی که در مستطیل مربوط به آن ها نقاط بیشتری وجود دارد برازندگی بیشتری دارند.

ب) کاهش اعضای مجموعه Pareto توسط دسته بندی^{۲۶}:

در یک مسأله ممکن است نقاط بهینه Pareto بسیاری داشته باشیم. ولی از دید تصمیم گیرنده نمایش تمام نقاط یافت شده، وقتی که تعداد آن ها از تعداد مقدار مشخصی فراتر رفت یک کار بلا استفاده است.

از طرف دیگر افزایش سائز P' در رفتار SPEA تأثیر منفی دارد چون P' در ایجاد جمعیت جدید شرکت دارد، و در نتیجه هم سرعت بهینه سازی را کاهش می دهد و هم تنوع جمعیت جدید را.

در الگوریتم SPEA از روشی به نام دسته بندی استفاده می شود. استفاده از این روش علاوه بر حفظ سائز P' در مقدار N' ، یکنواختی نقاط بهینه Pareto را در فضای هدف تا حدود زیادی تضمین می نماید. روش دسته بندی حاوی گام های زیر است:

(۱) مقدار دهی اولیه به مجموعه دسته C . هر کدام از اعضای P' ($i \in P'$) یک دسته مجزا را تشکیل می دهند.

$$C = \bigcup_i \{\{i\}\}$$

(۲) اگر $|C| \leq N'$ برو به مرحله ۳.

(۳) محاسبه فاصله تمامی جفت دسته های ممکن. فاصله بین ۲ دسته $C_1, C_2 \in C$ به صورت فاصله متوسط بین تک تک اعضای این ۲ دسته می باشد.

$$d = \frac{1}{|C_1| \cdot |C_2|} \cdot \sum_{i_1 \in C_1, i_2 \in C_2} \|i_1 - i_2\|$$

علامت $\|$ فاصله بین ۲ عضو i_1 و i_2 را نشان می دهد.

(۴) تشخیص دو دسته C_1 و C_2 با کمترین فاصله و ادغام دو دسته مزبور $C = C \setminus \{\{C_1, C_2\} \cup \{C_1 \cup C_2\}\}$. برو به مرحله ۲.

(۵) انتخاب یک عضو از میان هر دسته، به این صورت که نقطه ای که کمترین فاصله متوسط با سایر اعضای مجموعه را دارد بهترین است.

NSGA-II^{۲۷} (۲-۱-۴-۶)

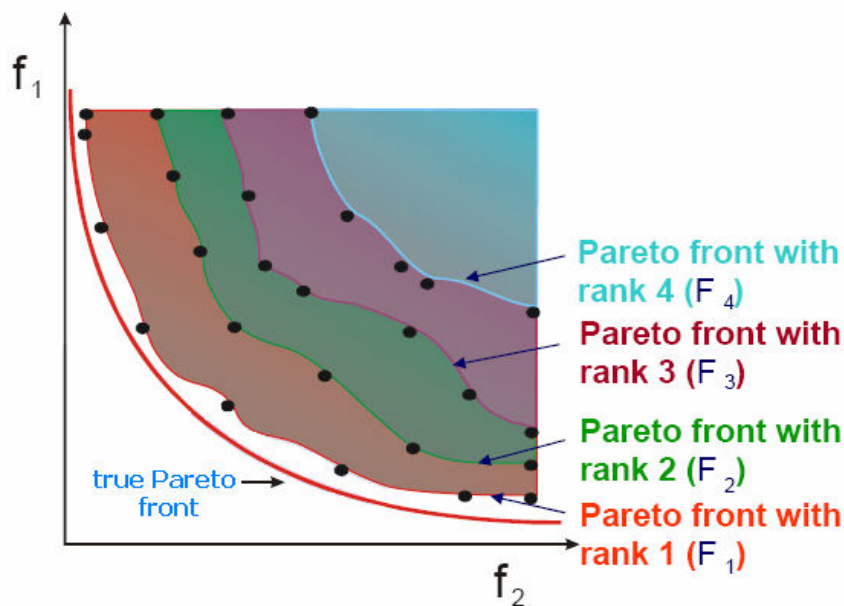
روش NSGA برای اولین بار در مقاله [۲۲] معرفی گردید. این روش دارای نقایصی بود که در مقاله [۹] اصلاح گردید و تحت عنوان NSGA-II نام گذاری شد. در مقاله [۹] با شبیه سازی های متعدد ادعا شده است که NSGA-II در یافتن Pareto-fronts بهتر از SPEA می باشد. برای آشنایی با این

روش در ابتدا مفهوم non-domination sorting و crowding distance sorting و سپس الگوریتم آن در ادامه شرح داده می شود.

الف) non-domination sorting

این روش یعنی این که اعضای یک جمعیت را بر اساس تعداد دفعاتی که هر کدام از اعضا مغلوب می شوند تقسیم بندی نماییم. آن هایی که هیچ گاه مغلوب نمی شوند در ماتریس F_1 ، آن هایی که تنها یک بار مغلوب می شوند در ماتریس F_2 و قرار می دهیم. مرجع [۹] توضیحات بیشتری را در مورد الگوریتم این روش ارائه می دهند.

شکل ۶-۸ non-domination sorting را به طور مفهومی نشان می دهد. همانطور که از این شکل نیز پیداست، ممکن است در یک بهینه سازی چند هدفه به Pareto-optimal front نرسیم.



شکل (۶-۸) non-domination sorting

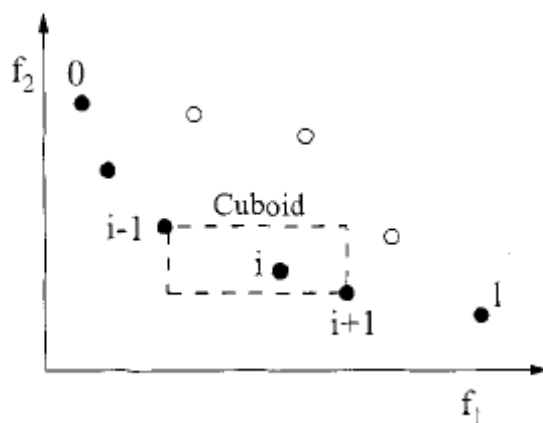
ب) crowding distance sorting

در این الگوریتم برای این که Pareto-optimal front به اندازه کافی یکنواخت و گسترده باشد، الگوریتم مرتب سازی بر اساس crowding distance پیشنهاد گردیده و ادعا شده که از نظر پیچیدگی

بهتر از روش های قبلی می باشد. اساس این روش همانطور که از نامش نیز پیداست، مرتب کردن اعضای جمعیت بر اساس فاصله آن ها در فضای توابع هدف می باشد.

فرض کنیم که طول جمعیت ما l باشد. ابتدا اعضای جمعیت را بر طبق اندازه f_1 و f_2 مرتب می کنیم. و به هر عضو یک $i_{distance}$ نسبت می دهیم که برابر است با حاصل جمع اضلاع مستطیلی که دو نقطه مجاور آن عضو در فضای توابع هدف دو راس آن را تشکیل می دهند بخش بر مجموع تفاضل بیشترین و کمترین مقدار f_1 و f_2 . شکل ۶-۹ این موضوع را بهتر نشان می دهد. در نهایت به نقاط ابتدایی و انتهایی جمعیت که در شکل با l و 0 نمایش داده شده اند $i_{distance}$ برابر با ∞ را نسبت می دهیم.

همانطور که در الگوریتم شرح داده می شود، در ایجاد جمعیت نسل بعدی اولویت با نقاط با $i_{distance}$ بیشتر خواهد بود (به علت این امر و نتیجه آن دقت کنید).



شکل (۶-۹) روش crowding distance sorting. نقاط توپر عضو یک non-dominated front هستند [۹]

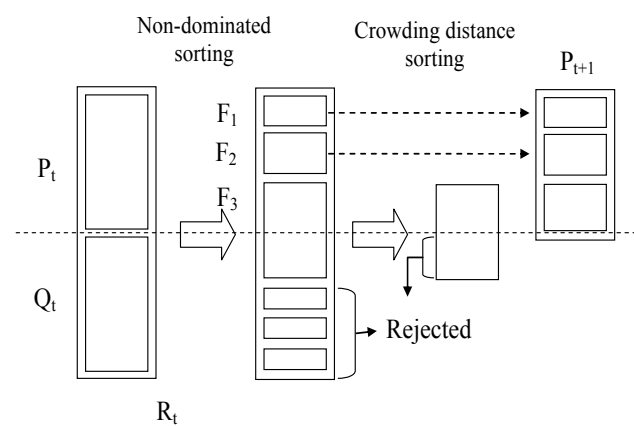
- ۱- ایجاد جمعیت والدین P با سایز N به صورت رندم.
- ۲- مرتب سازی جمعیت والدین بر مبنای روش non-domination.
- ۳- اختصاص برازندگی، و ایجاد جمعیت فرزندان Q با سایز N ، توسط binary tournament، recombination و جهش.
- ۴- ترکیب جمعیت والدین و فرزندان و ایجاد جمعیت R با سایز $2N$.

۵- مرتب سازی R بر طبق non-domination : $R = \{F_1, F_2, \dots\}$.

۶- تشکیل جمعیت جدید والدین P از روی R بر مبنای non-domination و crowding distance.

۷- در صورت رسیدن به شرط خاتمه، پایان و الا برو به مرحله ۲.

شکل ۶-۱۰ الگوریتم NSGA-II را نشان می دهد.



شکل (۶-۱۰) الگوریتم NSGA-II [۱۰]

۶-۴-۲ بازی های رقابتی: تعادل Nash

۶-۴-۲-۱ Nash GA

این روش یک بهینه سازی رقابتی است که در ابتدا توسط Nash پیشنهاد گردید. برای یک بهینه سازی با n تابع هدف، n بازیکن داریم که هریک تابع هدف خودش را بهینه می کند. در حالی که سایر توابع هدف توسط بازیکنان دیگر ثابت هستند. هنگامی که هیچ یک از بازیکنان نتوانند تابع خود را بهبود بخشند، به این معنی است که سیستم به حالت تعادل رسیده است و از آن تحت عنوان تعادل Nash یاد می شود.

برای دو بازیکن و دو مجموعه از متغیرهای X و Y ، فرض می کنیم که E فضای جست و جو برای X و F فضای جست و جو برای Y باشد. از جفت استراتژی $(\bar{x}, \bar{y})$ تحت عنوان تعادل Nash یاد می شود اگر

$$f_e(\bar{x}, \bar{y}) = \inf_{x \in E} f_e(x, \bar{y})$$

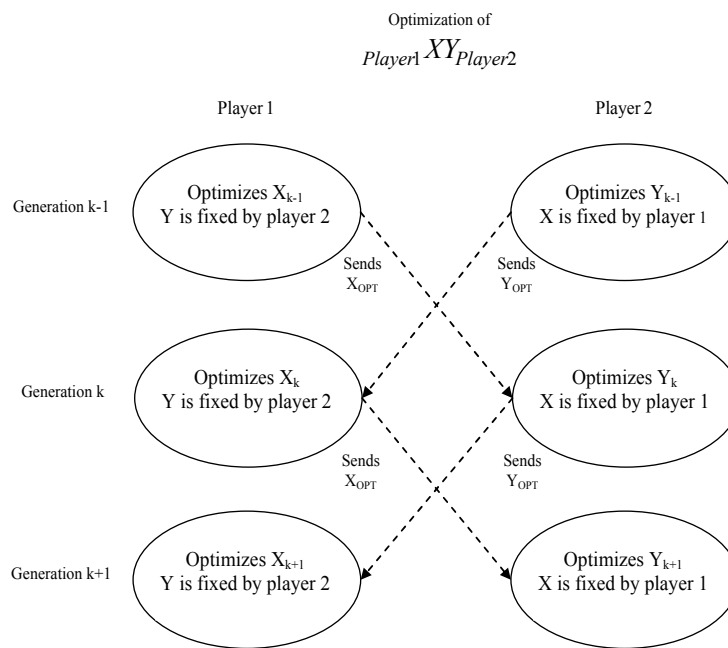
$$f_F(\bar{x}, \bar{y}) = \inf_{y \in F} f_F(\bar{x}, y)$$

مشکل اصلی روش های کلاسیک این است که تعادل Nash را به سختی پیدا می کنند. اثبات وجود تعادل Nash خیلی ساده تر از یافتن آن است. ایده اصلی Nash GA، ترکیب الگوریتم ژنتیک با استراتژی Nash است [۱۰].

برای فهم بهتر این روش بهینه سازی با دو تابع هدف را توسط دو بازیکن شرح می دهیم. فرض می کنیم X مجموعه متغیرهایی باشد که توسط بازیکن I اداره می شوند و Y مجموعه متغیرهایی باشد که توسط بازیکن II اداره می شوند. باتوجه به تئوری Nash، بازیکن I، X را بهینه سازی می کند طوریکه f_1 می نیمم شود در حالی که Y ثابت است و بازیکن II، Y را بهینه سازی می کند طوریکه f_2 می نیمم شود در حالی که X ثابت است.

در مرحله اول دو جمعیت (ترجیحاً با طول یکسان) به طور رندم و به صورت مجزا برای X و Y ایجاد می شود و از هر جمعیت مطابق با اصول الگوریتم ژنتیک جمعیت نسل بعدی به وجود می آید. فرض کنیم X_{k-1} مقدار بهینه یافته شده توسط بازیکن I و Y_{k-1} مقدار بهینه یافته شده توسط بازیکن II در نسل $k-1$ باشد. در نسل k بازیکن I، X_k را بهینه می کند وقتی که Y در Y_{k-1} ثابت است و بازیکن II، Y_k را بهینه می کند وقتی که X در X_{k-1} ثابت است. و همین روند در نسل بعدی نیز تکرار می شود. این الگوریتم تا جایی تکرار می شود که دیگر هیچ یک از بازیکنان I و II نتوانند توابع خود را بهبود ببخشند.

اگر تعداد متغیرها از تعداد بازیکنان بیشتر شد باید به طور معقول بین آن ها تقسیم گردد. شکل ۶-۱۱ الگوریتم روش مزبور را نشان می دهد.



شکل (۶-۱۱) الگوریتم Nash GA [۱۰]

مثال (۶)

توابع زیر را در نظر بگیرید. فرض کنیم ۲ بازیکن A و B بهینه سازی این دستگاه ۲ معادله ۲ مجهولی را انجام می دهند. ابتدا از طریق تحلیلی جواب ها را به دست می آوریم.

$$\begin{cases} f_A(x, y) = (x-1)^2 + (x-y)^2 \\ f_B(x, y) = (y-3)^2 + (x-y)^2 \end{cases}$$

- در حالت بازی مشارکتی همانطور که قبلاً گفته شده است، بازیکنان سعی دارند هر دو تابع را همزمان بهینه کنند. در این حالت می توانیم پارامتری به نام $\lambda \in (0,1)$ تعریف کنیم و تابع برازندگی زیر را بهینه کنیم:

$$F(x, y, \lambda) = \lambda \times f_A(x, y) + (1-\lambda) \times f_B(x, y)$$

بنا براین داریم:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_A(x, y, \lambda)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial f_B(x, y, \lambda)}{\partial y} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{\lambda^2 + \lambda - 3}{\lambda^2 - \lambda - 1} \\ y = \frac{3\lambda^2 - \lambda - 3}{\lambda^2 - \lambda - 3} \end{cases}$$

در نتیجه به ازای هر مقدار $\lambda \in (0,1)$ ، یک مقدار (x, y) به دست می آید که مجموعه این نقاط همان Pareto-optimal front هستند.

- در بازی رقابتی هرکدام از بازیکنان سعی در بهینه سازی تابع هدف خود را دارند.

بنابر این داریم:

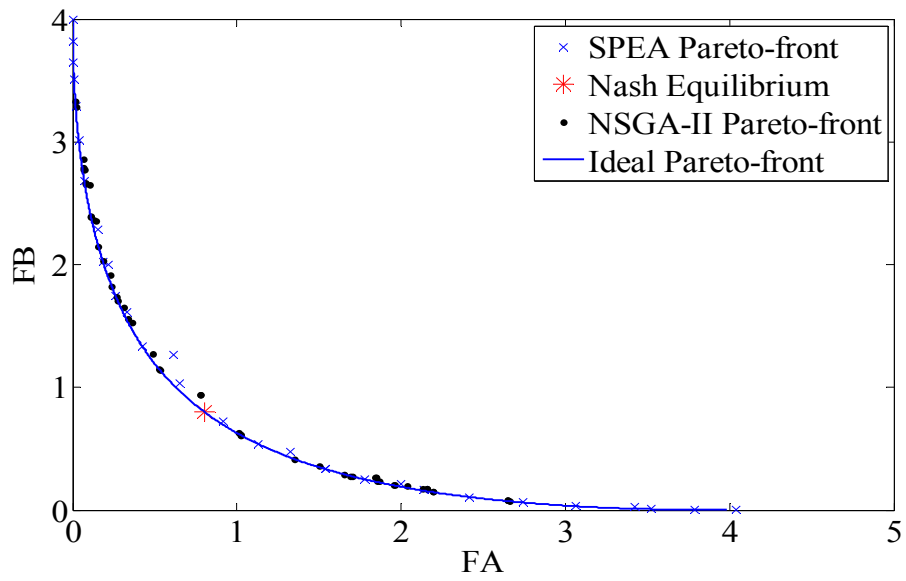
$$\begin{cases} \frac{\partial f_A(x, y)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial f_B(x, y)}{\partial y} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y = 2x - 1 \\ y = \frac{x + 3}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = 1.66, f_A = 0.88 \\ y = 2.33, f_B = 0.88 \end{cases}$$

حال این دستگاه را توسط الگوریتم های SPEA، NSGA-II و Nash GA حل می کنیم. که نتیجه به صورت شکل ۶-۱۲ است.

در الگوریتم SPEA، تعداد نسل برابر ۱۰۰، طول ماتریس $P'(N')$ برابر ۳۰ و طول جمعیت (N) برابر ۷۰ انتخاب گردیده است و نیز در الگوریتم NSGA-II، تعداد نسل برابر ۱۰۰، و طول جمعیت (N) برابر ۵۰ انتخاب گردیده است تا بتوان ۲ روش را باهم مقایسه نمود.

همچنین recombination، selection و جهش در هر دو روش یکسان انتخاب شده اند.

همانطور که مشاهده می شود، در این مسأله SPEA و NSGA-II جواب های متعددی دارند و به Pareto-optimal front همگرا شده اند. و همانطور که قبلاً ذکر شده بود Nash GA یک جواب به عنوان پاسخ بهینه داده است. در این مثال جواب Nash روی Pareto-optimal front قرار دارد که البته همیشه این امر صادق نیست.



شکل (۶-۱۲) مقایسه الگوریتم های بهینه سازی

فصل هفتم

بررسی نتایج شبیه سازی

۷-۱) بهینه سازی در حوزه زمان

۷-۱-۱) طراحی PSS برای SMIB

معمولاً روش های طراحی PSS ابتدا روی سیستم SMIB اجرا می شوند. در این پروژه نیز ابتدا طراحی را روی SMIB که مشخصات این سیستم در بخش ۵-۲ ذکر شد، پیاده سازی کرده ایم. برای سیستم SMIB ابتدا PSS دلتا-امگا را به دو روش SPEA به عنوان یکی از روش هایی که با تئوری بازی قابل تفسیر است و روش کلاسیک طراحی و با هم مقایسه کرده ایم. سپس همین کار را با PSS4B نیز تکرار کرده ایم. برای طراحی PSS توسط SPEA در حوزه زمان، یک خطای سیگنال کوچک به ولتاژ مرجع سیستم تحریک اعمال شده و توابع هدف که عبارتند از زمان استقرار و پیک منحنی تغییرات انحراف زاویه روتور، محاسبه شده اند. شرح این خطا در جدول ۷-۶ آمده است.

۷-۱-۱-۱) طراحی PSS دلتا-امگا توسط روش SPEA و مقایسه آن با روش کلاسیک

روش SPEA از الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب های بهینه استفاده می کند. بنابراین ذکر مشخصاتی از SPEA که با الگوریتم ژنتیک مرتبط است ضروری به نظر می رسد. جدول ۶-۱ پارامترهای مربوط به SPEA را نشان می دهد. همانطور که از این جدول مشخص است، با توجه به تجربه تعداد نسل ۳۰ و طول جمعیت ۸۰ انتخاب شده است. در فصل ۵ لزوم کنترل سائز جمعیت غالب ها شرح داده شد. از طرفی در مرجع [۸] نسبت ۱ به ۴ بین N و N' (به ترتیب جمعیت اصلی و غالب) جهت عملکرد مناسب الگوریتم توصیه شده است. بنابراین N' برابر ۲۰ انتخاب شده است. سایر پارامترها نیز بنابر تجربه انتخاب گردیده اند.

جدول (۱-۷) پارامترهای الگوریتم ژنتیک مرتبط با SPEA

پارامتر	شرح
تعداد نسل	30
سایز جمعیت	$N=80$ & $N'=20$
طول کروموزم	20
روش Selection	چرخ گردان
Recombination	single-point crossover
جهش	discrete with probability of 0.035

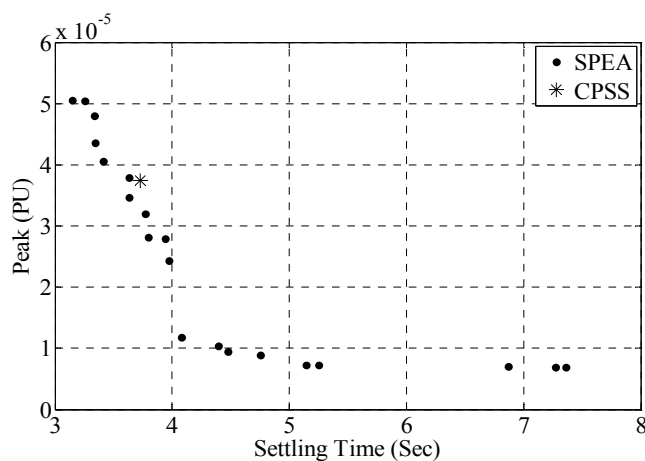
مقدار عددی پارامترهای PSS پس از طراحی کلاسیک در جدول ۲-۷ اشاره شده اند و از آن تحت عنوان $CPSS^1$ یاد شده است. همچنین محدوده متغیرهای طراحی که با توجه به $CPSS$ تعیین گردیده اند در این جدول ذکر شده اند.

جدول (۲-۷) حدود پارامترهای طراحی PSS دلتا-امگا

Parameters	CPSS	حد پایین	حد بالا
T_1	۰/۰۵	۰/۰۱	۱
T_2	۰/۰۲	۰/۰۱	۱
T_3	۳	۱	۱۰
T_4	۵/۴	۱	۱۰
K_{PSS}	۳۰	۱۰	۱۰۰

شکل ۱-۷ نتیجه طراحی را نشان می دهد. با توجه به این شکل $CPSS$ خوب طراحی شده و نزدیک به نقاط Pareto-front قرار دارد. از طرفی شیب تغییرات پیک بر حسب زمان استقرار در Pareto-front هنگامی که زمان استقرار بیشتر از ۴ ثانیه می باشد، ملایم است ولی پس از این نقطه شیب منحنی افزایش می یابد. این امر بیانگر مشخصاتی از سیستم است که می تواند مورد توجه قرار

گیرد. نکته مهم دیگر این است که تغییرات پیک انحراف سرعت (برحسب پریونیت) در بین نقاط Pareto-front کم است.



شکل (۱-۷) Pareto-front مربوط به پایدار ساز دلتا- امگا در مقایسه با طراحی کلاسیک

۲-۱-۱-۷ طراحی PSS4B توسط روش SPEA و مقایسه آن با CPSS

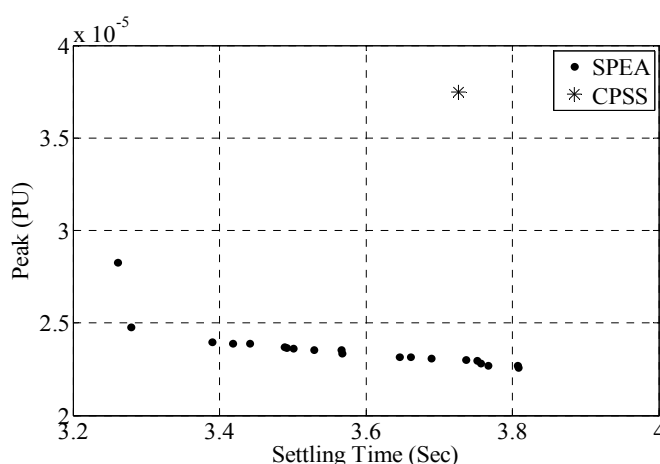
در این بخش پارامترهای مربوط به SPEA مشابه جدول ۱-۷ انتخاب شده اند. همچنین محدوده متغیرهای PSS4B با توجه به مرجع [۱۶]، مطابق جدول ۳-۷ انتخاب گردیده است. مرجع [۱۶] چندین طراحی PSS4B را باهم مقایسه کرده است.

جدول (۳-۷) محدوده پارامترهای

طراحی PSS4B

Parameters	حد پایین	حد بالا
K_L	۱۰	۲۵
K_I	۲۵	۴۵
K_H	۱۰۰	۱۶۰
F_L	۰/۰۵	۰/۲
F_I	۰/۱	۱
F_H	۱۰	۱۴
V_{Lm}	۰/۰۱	۰/۲
V_{Im}	۰/۱	۰/۸
V_{Hm}	۰/۱	۰/۸
V_{Sm}	۰/۱	۰/۸

شکل ۷-۲ Pareto-front حاصله را نمایش می دهد که همان طراحی های بهینه برای PSS4B هستند. همچنین برای مقایسه CPSS نیز در این شکل نشان داده شده است. با دقت در این شکل در می یابیم که اکثر نقاط Pareto-front بر طراحی CPSS غلبه می کنند در حالی که در پایدار ساز دلتا- امگا اینگونه نبود. نکته دیگر این است که محدوده تغییرات زمان استقرار و پیک نسبت به پایدار ساز دلتا- امگا کمتر است. در این شکل نیز نقاط Pareto-front به لحاظ پیک تفاوت چندانی باهم ندارند.



شکل (۷-۲) Pareto-front مربوط به PSS4B در مقایسه با طراحی کلاسیک

۷-۱-۱-۳) مقایسه نتایج و بررسی عملکرد پایدارسازها در شرایط خطا

با توجه به تغییرات کم پیک در مقابل تغییرات زمان استقرار که در شکل های ۷-۱ و ۷-۲ مشاهده گردید، نزدیکترین نقاط به محور عمودی را به عنوان PSS های مطلوب انتخاب می کنیم تا بررسی های بیشتری روی آن ها انجام دهیم. جداول ۷-۴ و ۷-۵ پارامترهای این PSS ها را نمایش می دهند.

جدول (۷-۴) مشخصات PSS
دلنا- امگای انتخابی برای SMIB

پارامتر	مقدار
T_1	۰/۰۹۵
T_2	۰/۰۳۲
T_3	۲/۷۶
T_4	۹/۷
K_{PSS}	۲۹/۴

جدول (۷-۵) مشخصات PSS4B
انتخابی برای SMIB

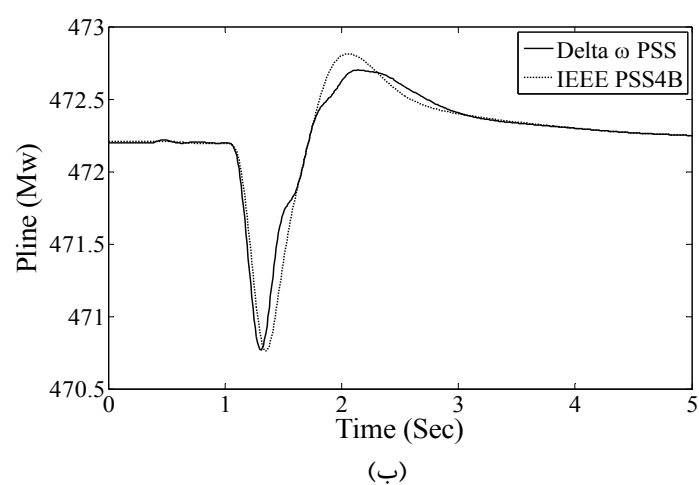
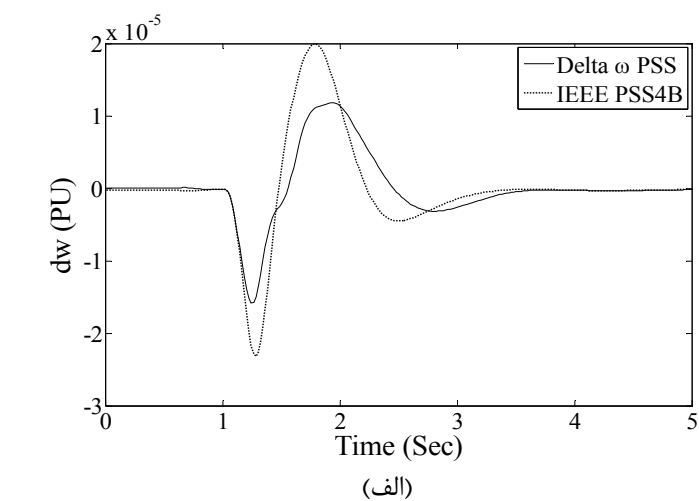
پارامتر	مقدار
K_L	۱۹/۲
K_I	۲۵/۹
K_H	۱۱۰/۲۲
F_L	۰/۱۴
F_I	۰/۸
F_H	۱۰/۱۸
V_{Lm}	۰/۰۱۶
V_{Im}	۰/۷۸
V_{Hm}	۰/۲۶
V_{Sm}	۰/۲۶

معمولاً جهت ارزیابی عملکرد پایدارساز خطاهای مختلفی به سیستم اعمال و پایداری سیستم تحت این شرایط بررسی می گردد. در این پروژه نیز همین کار با نصب PSSهای انتخابی بر روی SMIB انجام شده است. جدول ۷-۶ شرح خطای های اعمال شده را که شامل یک خطای سیگنال کوچک و دو خطای سیگنال بزرگ است ارائه می دهد.

جدول (۷-۶) لیست خطاهای اعمال شده به سیستم SMIB جهت ارزیابی PSS

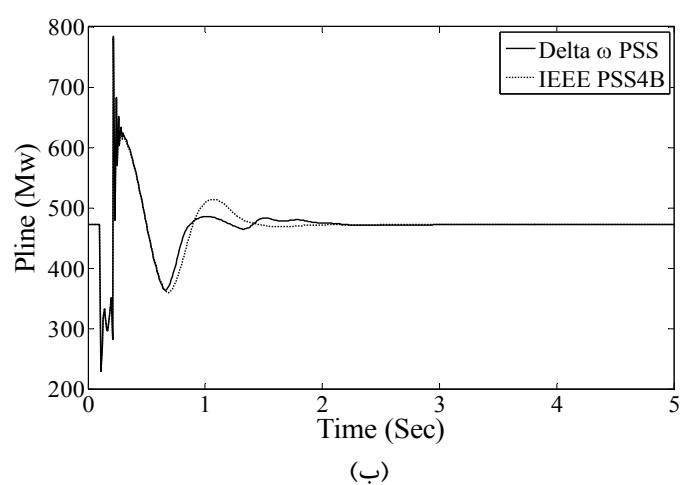
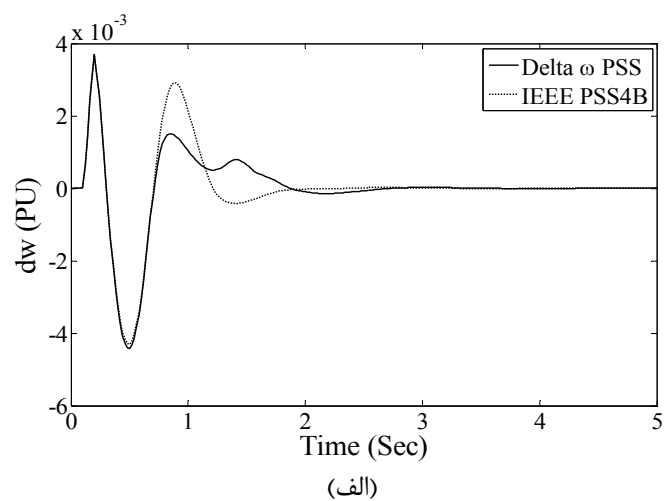
شرح	نوع خطا
افزایش ۵ درصدی در ولتاژ مرجع ورودی ژنراتور سنکرون به مدت ۱۲ سیکل و به صورت پله	سیگنال کوچک
اعمال خطای تک فاز به زمین به شین نیروگاه که در ۰/۱ ثانیه شروع شده و به مدت ۱۰ سیکل ادامه می یابد	سیگنال بزرگ
اعمال خطای سه فاز به زمین به شین نیروگاه که در ۰/۱ ثانیه شروع شده و به مدت ۱۰ سیکل ادامه می یابد	

شکل های ۷-۳ تا ۷-۵ نتایج ارزیابی را نشان می دهند.

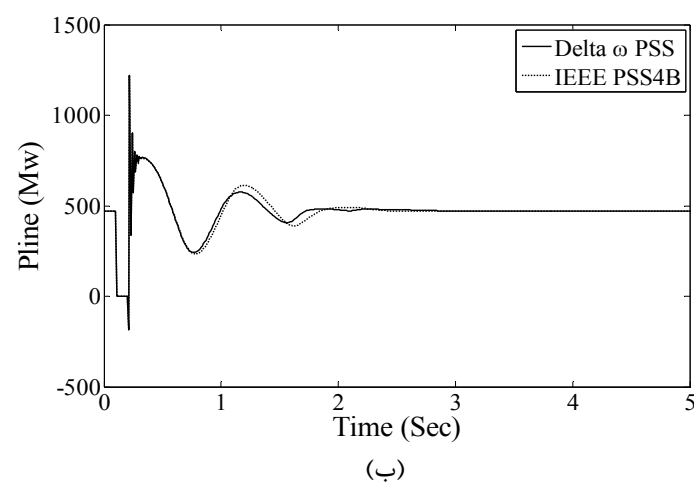
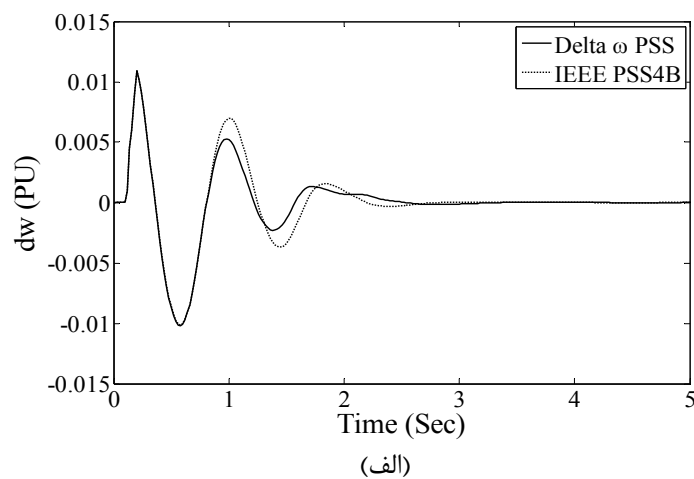


شکل (۷-۳) اعمال خطای سیگنال کوچک به سیستم SMIB. الف) منحنی تغییرات انحراف سرعت زاویه ای روتور ب)

منحنی تغییرات توان انتقالی خط



شکل (۷-۴) اعمال اتصال کوتاه تک فاز به زمین در سیستم SMIB. الف) منحنی تغییرات انحراف سرعت زاویه ای روتور ب) منحنی تغییرات توان انتقالی خط



شکل (۵-۷) اعمال اتصال کوتاه سه فاز به زمین در سیستم SMIB. الف) منحنی تغییرات انحراف سرعت زاویه ای روتور
ب) منحنی تغییرات توان انتقالی خط

با توجه به شکل های ۳-۷ تا ۵-۷ که منحنی تغییرات انحراف سرعت زاویه ای روتور و توان انتقالی خط را نشان می دهند، پایدارسازهای بهینه دلتا- امگا و PSS4B هر دو از عملکرد قابل قبولی برخوردارند. با بررسی دقیق منحنی ها در سه حالت خطا در می یابیم که PSS4B زمان استقرار کمتری دارد ولی پایدارساز دلتا- امگا از دامنه تغییرات کوچکتری برخوردار است.

۷-۱-۲) طراحی PSS برای سیستم ۲ ناحیه ای ۴ ماشینه

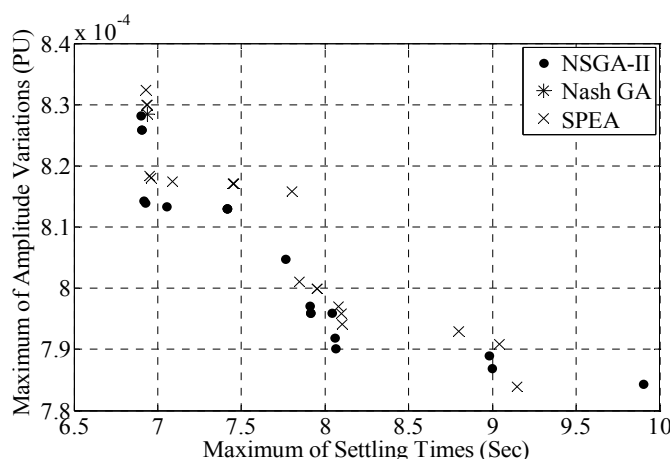
یکی از سیستم هایی که به علت داشتن نوسانات بین ناحیه ای قوی مورد علاقه پژوهشگران دینامیک سیستم های قدرت می باشد، سیستم ۲ ناحیه ای ۴ ماشینه کندور است. پس از این ما از این سیستم که در فصل ۵ مشخصات آن شرح داده شد به عنوان TAFM² یاد خواهیم کرد. برای این سیستم PSS4B را به سه روش SPEA، Nash GA و NSGA طراحی و با هم مقایسه خواهیم نمود. PSS4B های یکسان در ژنراتورهای G_1 و G_4 نصب شده است، در حالی که سایر واحدها فاقد PSS هستند [۲۳] و [۱۶]. از آنجائیکه هر سه روش ذکر شده الگوریتم ژنتیک را برای رسیدن به جواب مطلوب به کار می گیرند، مشخصات الگوریتم ها مرتبط با ژنتیک در جدول ۷-۷ آمده است. برای اینکه شرایط مناسبی برای ارزیابی هر سه روش وجود داشته باشد تعداد نسل ها و طول جمعیت طوری انتخاب شده اند که تعداد اجرای برنامه سیمولینک در همه آنها مساوی و برابر ۲۱۰۰ بار باشد. سایر پارامترها نیز یکسان انتخاب گردیده اند. در این سیستم نیز سعی شده تا نسبت ۱ به ۴ بین N و N' تا حدودی رعایت گردد.

جدول (۷-۷) پارامتر های الگوریتم ژنتیک مرتبط با الگوریتم های طراحی

Parameter	SPEA	NSGA-II	Nash GA
تعداد نسل	30	53	30
سایز جمعیت	$N=70$ & $N'=20$	20	35
طول کروموزم	20	مشابه SPEA	مشابه SPEA
روش Selection	چرخ گردان	مشابه SPEA	مشابه SPEA
Recombination	single-point crossover	مشابه SPEA	مشابه SPEA
جهش	Discrete with probability of 0.035	مشابه SPEA	مشابه SPEA

توابع هدف پس از اعمال خطای سیگنال کوچک ذکر شده در جدول ۷-۶ به ژنراتور شماره ۱ محاسبه شده اند. اولین تابع هدف بهینه سازی عبارت است از ماکزیمم زمان استقرار بین نوسانات زاویه روتور

چهار ژنراتور. دومین تابع هدف عبارت است از ماکزیمم تغییرات دامنه بین نوسانات زاویه روتور چهار ژنراتور. شکل ۶-۷ دو Pareto-front به عنوان نتیجه طراحی PSS4B توسط NSGA-II و SPEA و یک نقطه تعادل Nash که نتیجه طراحی PSS4B توسط Nash GA است، را نشان می دهد.



شکل (۶-۷) طراحی های بهینه به دست آمده توسط روش های مرتبط با تئوری بازی برای PSS4B

با توجه به این شکل Pareto-front مرتبط با NSGA و SPEA هر دو توزیع و گستردگی نسبتاً خوبی دارند. همچنین نقاط Pareto-front در راستای محور عمودی اختلاف چندانی باهم ندارند. همانطور که قبلاً گفته شد طراح می تواند یک از این نقاط را با توجه به علاقه مندی و نیاز خود انتخاب کند. در اینجا با توجه به نکته ای که ذکر گردید نقاط نزدیک به محور عمودی که دارای کمترین زمان استقرار و بیشترین دامنه تغییرات است مورد علاقه ماست. حال به نتیجه Nash GA توجه می کنیم که همان تعادل Nash است. این نقطه خیلی نزدیک به نقطه ای است که ما انتخاب کردیم و این ممکن بحث انتخاب عقلانی بازیکنان در تعادل Nash را نشان دهد.

در نهایت ما نقطه تعادل Nash را به عنوان طراحی برتر خود بر می گزینیم. جدول ۷-۸ مشخصات طراحی بهینه ما را نشان می دهد که معقول به نظر می رسد.

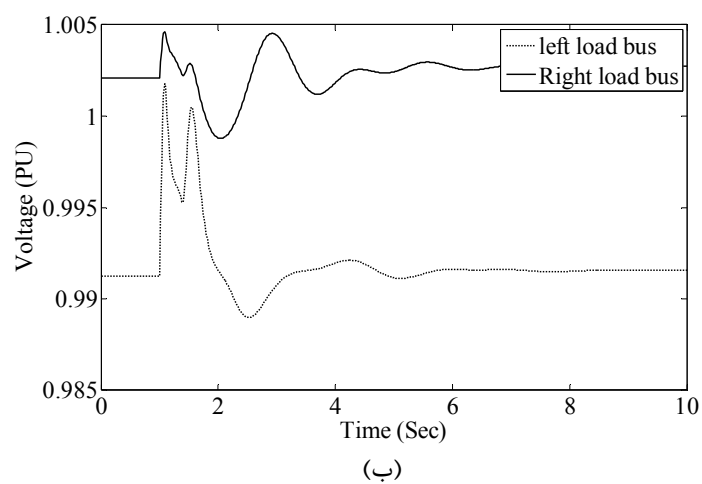
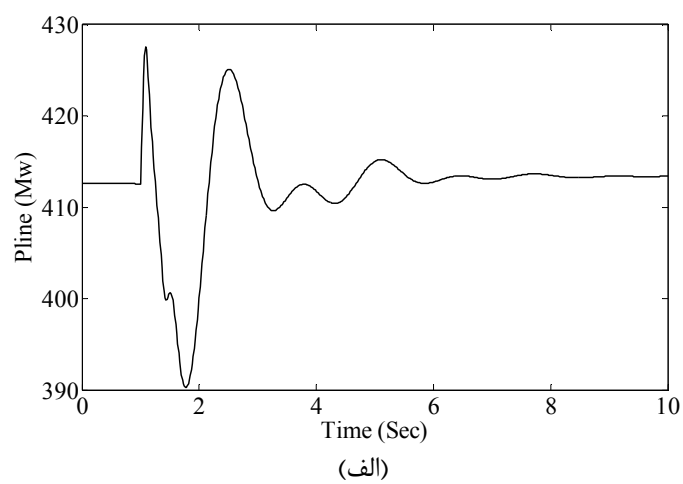
شکل (۷-۸) مشخصات PSS4B انتخابی برای TAFM

پارامتر	مقدار
K_L	۱۶/۱
K_I	۴۰/۶
K_H	۱۵۱/۸۴
F_L	۰/۰۷۸
F_I	۱
F_H	۱۰/۳
V_{Lm}	۰/۰۷
V_{Im}	۰/۳۳
V_{Hm}	۰/۷۴
V_{Sm}	۰/۱۵

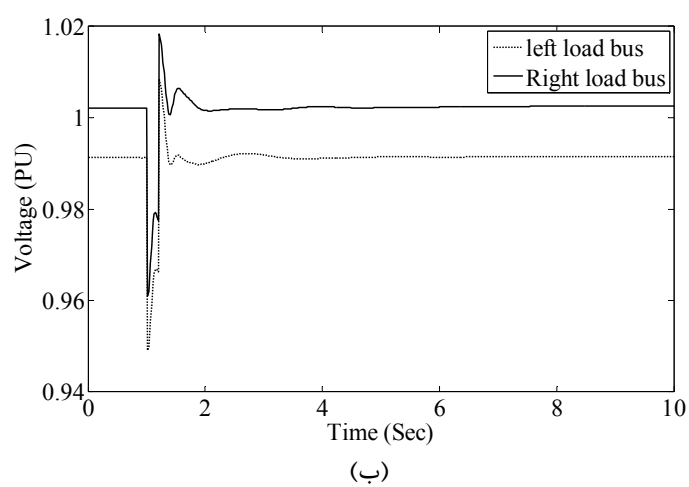
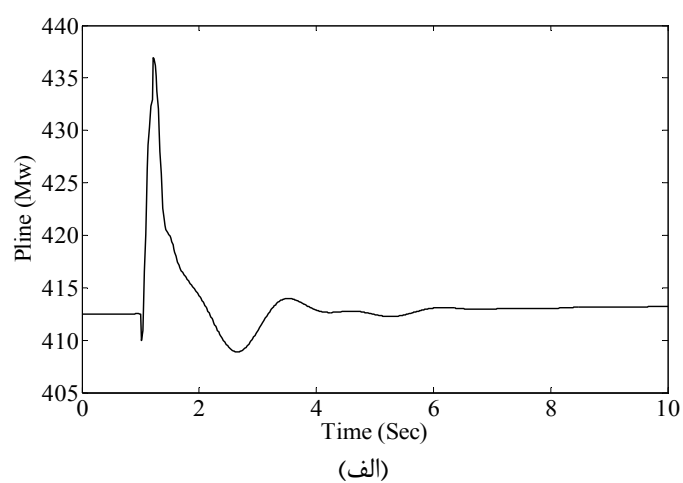
جهت بررسی نحوه عملکرد این PSS4B خطاهای مختلفی به سیستم اعمال و نتایج در ادامه آورده شده است. جدول ۷-۹ شرح این خطاها را ارائه می کند.

جدول (۷-۹) لیست خطاهای اعمال شده به سیستم TAFM جهت ارزیابی PSS

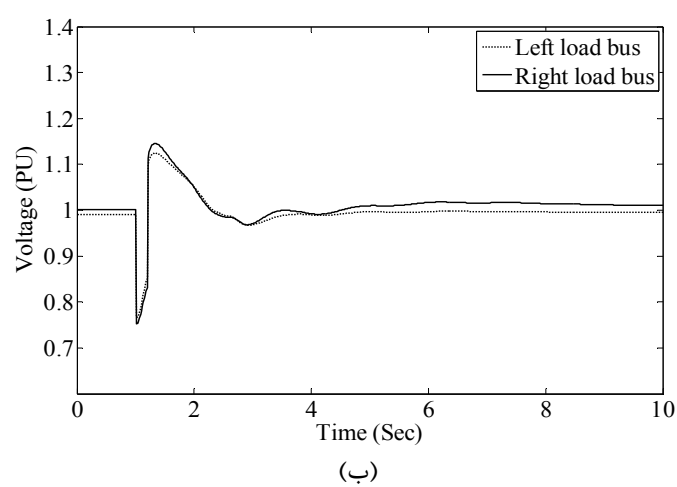
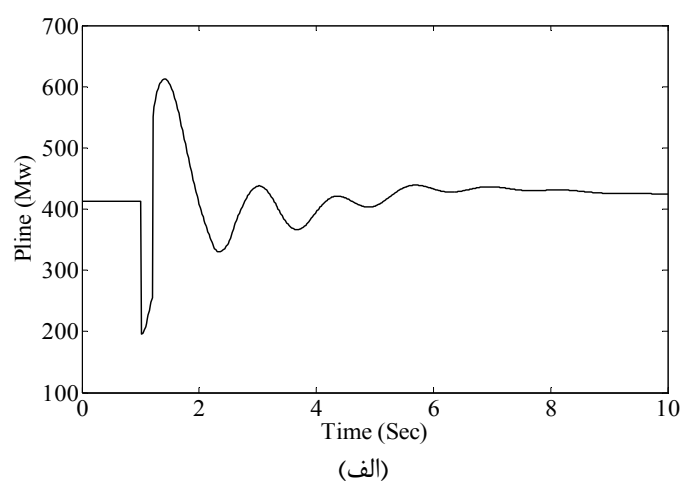
شرح		نوع خطا
افزایش ۵ درصدی در ولتاژ مرجع ورودی ژنراتور سنکرون ۱ به مدت ۱۲ سیکل و به صورت پله		سیگنال کوچک
اعمال خطای تک فاز به زمین در شین نیروگاه ۱ به مدت ۱۲ سیکل که خود به خود برطرف می شود	LD ₁	سیگنال بزرگ
اعمال خطای سه فاز به زمین در شین نیروگاه ۱ به مدت ۱۲ سیکل که خود به خود برطرف می شود	LD ₂	
اعمال خطای سه فاز به زمین در شین بار سمت چپ به مدت ۹ سیکل که خود به خود برطرف می شود و همچنین ۶۰ درصد L ₁ از مدار خارج می شود	LD ₃	



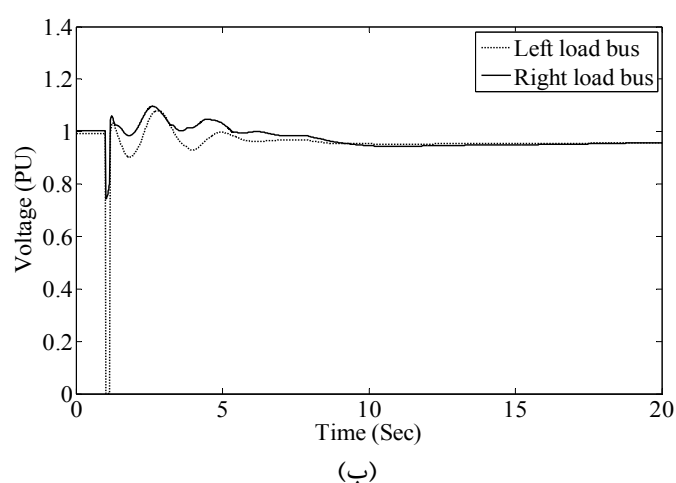
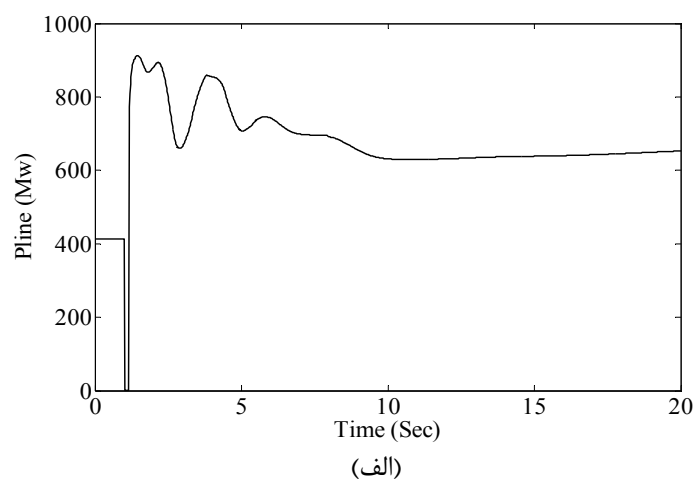
شکل (۷-۷) اعمال خطای سیگنال کوچک به سیستم TAFM. (الف) منحنی تغییرات توان انتقالی خط (ب) منحنی تغییرات ولتاژ شین های بار



شکل (۷-۸) اعمال خطای LD1 به سیستم TAFM. الف) منحنی تغییرات توان انتقالی خط ب) منحنی تغییرات ولتاژ شین های بار



شکل (۷-۹) اعمال خطای LD_2 به سیستم TAFM. الف) منحنی تغییرات توان انتقالی خط ب) منحنی تغییرات ولتاژ شین های بار



شکل (۷-۱۰) اعمال خطای LD_3 به سیستم TAFM. الف) منحنی تغییرات توان انتقالی خط ب) منحنی تغییرات ولتاژ شین های بار

همانطور که مشاهده می شود، شکل های ۷-۷ تا ۷-۱۰ پایداری سیستم TAFM با PSS4B بهینه طراحی شده توسط تئوری بازی را در خطاهای ذکر شده اثبات می کنند.

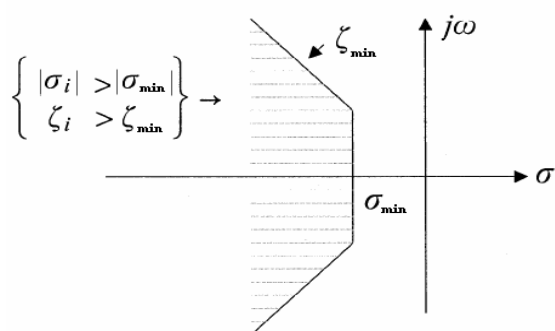
۷-۲) بهینه سازی در حوزه فرکانس

روشی که برای طراحی بهینه ای PSS به کار گرفته شد دارای معایبی است که برخی از آن ها به صورت زیر می باشند:

- خطای سیگنال کوچکی که به ژنراتور اعمال می شود ممکن است برخی از مدها را تحریک ننماید و بنابراین سیستم با PSS طراحی شده پایدار نشود.

- تحلیل سیستم های بزرگ با صدها شین و ده ها ژنراتور در حوزه زمان کاری سخت و شاید غیر عملی می باشد.

- مشخصات سیگنالی که مینیمم سازی زمان استقرار و اورشوت آن به عنوان توابع هدف در نظر گرفته می شوند با مشخصات سایر سیگنال ها مانند توان خطوط و ولتاژ شین ها تفاوت دارد. بنابر این با توجه به مقالات اخیر، در ادامه پروژه از روش جدیدتر و کامل تری استفاده گردیده است. مقاله [۲۴] برای طراحی بهینه PSS دو تابع هدف را در نظر گرفته و به هرکدام از آن ها یک وزن اختصاص داده است. در نهایت مجموع وزن دهی شده این دو تابع هدف را به عنوان تابع هدف نهایی در نظر گرفته است. در نظر گرفتن یک نسبت میرایی حداقل برای مدهای نوسانی غالب سیستم قدرت تابع هدف اول و شیفیت دادن این مدها به سمت چپ صفحه اعداد مختلط تابع هدف دوم بوده است. شکل ۷-۱۱ به فهم بیشتر این موضوع کمک می نماید. مقاله فوق الذکر اثبات کرده است که اگر مساله طراحی بهینه PSS را با تنها یکی از توابع هدف فوق انجام دهیم، تابع هدف دیگر ممکن است ارضا نشود و جواب مطلوبی به دست نیاید.



شکل (۷-۱۱) نمایش مفهومی توابع هدف در صفحه مختلط

با توجه به مطالب بیان شده، در این پروژه پس از خطی سازی سیستم قدرت حاوی PSS، دو تابع هدف زیر بهینه سازی می گردند.

$$\text{Maximize: } y_1 = (\text{Min}(\text{abs}(\sigma_i)))$$

$$\text{Maximize: } y_2 = (\text{Min}(\xi_i))$$

که در آن σ_i و ξ_i به ترتیب قسمت حقیقی و نسبت میرایی مقدارویژه i ام سیستم قدرت می باشند. در این روش تنها پایدارساز دلتا- امگا برای طراحی در نظر گرفته شده است و مانند روش قبلی، پارامترهای PSS متغیرهای طراحی اند. در اینجا حد بالا و پایین محدود کننده به عنوان متغیر ششم برای طراحی PSS در نظر گرفته می شود. این امر یافتن جواب های بهینه راحت تر می کند. در طراحی، حد بالا و پایین محدود کننده برابر و براساس تجربه بین ۰/۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شده اند. حدود سایر متغیرها همانند جدول ۷-۲ می باشد. همچنین پارامترهای SPEA مشابه جدول ۷-۱ هستند و تنها تعداد نسل متفاوت و برابر ۵۰ است.

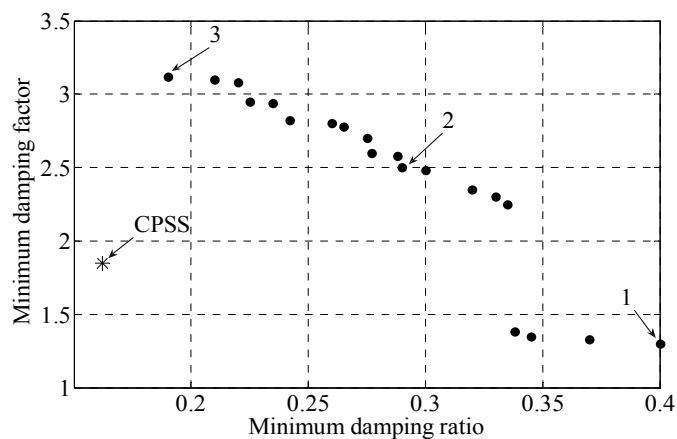
روش بهینه سازی جدید، روی دو سیستم SMIB و TAFM پیاده سازی می شود. در سیستم SMIB، این روش با CPSS و در سیستم TAFM با روش ارائه شده در [۲۴] مقایسه می گردد.

۷-۲-۱) طراحی PSS برای SMIB

شکل ۷-۱۲ Pareto-front بدست آمده از SPEA را در مقایسه با طراحی کلاسیک PSS دلتا- امگا نمایش می دهد. همانطور که مشخص است، CPSS توسط اکثر نقاط Pareto-front مغلوب می شود. یعنی اکثر طراحی های بهینه ما بهتر از روش طراحی کلاسیک هستند و در مورد سایر نقاط هم چیزی نمی توان گفت. از طرفی رنج تغییرات توابع هدف بهتر از شکل ۷-۱ است. این امر نشان می دهد که توابع هدف جدید در مقایسه با توابع هدف قبلی باهم رقابت بیشتری دارند.

نکته دیگر این است که مینیمم نسبت میرایی و مینیمم ضریب میرایی در Pareto-front رابطه خطی باهم ندارند و منحنی مربوطه از دو منحنی نسبتاً خطی تشکیل شده است که شیب یکی از آن ها خیلی کم است. برای مقایسه بیشتر سه طراحی با موقعیت های مختلف در Pareto-front انتخاب

شده اند. جدول ۷-۱۰ مقادیر عددی پارامترهای این سه نقطه را به همراه مشخصات CPSS ارائه می کند.

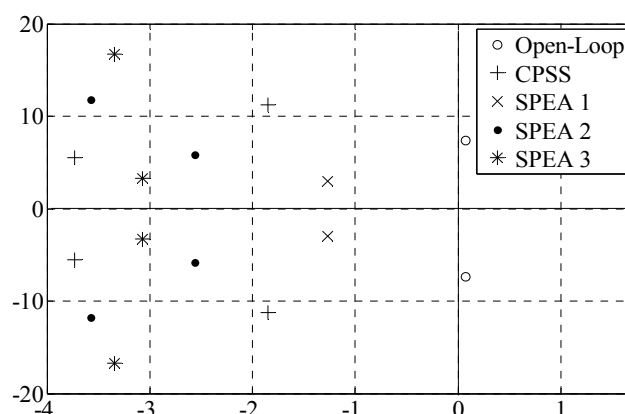


شکل (۷-۱۲) Pareto-front سیستم SMIB در مقایسه با طراحی کلاسیک

جدول (۷-۱۰) مشخصات PSSهای انتخاب شده و CPSS

پارامترها	SPEA 1	SEPA 2	SPEA 3	CPSS
T_1	۰/۳۵	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۵
T_2	۰/۰۱۲	۰/۰۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۲
T_3	۶/۹	۷/۱۷	۶/۹۲	۳
T_4	۷/۵۴	۸/۴	۷/۵۴	۵/۴
V_{Smax}	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۵
K_{PSS}	۴۳/۴	۱۵/۷	۴۳/۴	۳۰

قطب های نوسانی غالب سیستم تک ماشینه با PSSهای انتخابی و CPSS در شکل ۷-۱۳ نمایش داده شده است. در این شکل ناپایداری سیستم حلقه باز (بدون PSS) مشخص می باشد.



شکل (۷-۱۳) قطب های نوسانی غالب سیستم تک ماشینه با PSS های منتخب

۷-۲-۲) طراحی PSS برای سیستم ۲ ناحیه ای ۴ ماشینه

در ادامه پایدارساز دلتا- امگا برای TAFM طراحی شده است. برای بررسی قابلیت های روش ارائه شده در این پروژه، با کمک مقاله [۲۴] مجموع وزن دهی شده توابع هدف به عنوان یک تابع هدف جدید در نظر گرفته شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شده است. از این روش با نام MOGA³ یاد می کنیم، چون یک بهینه سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. با توجه به مقاله ذکر شده و تجربه، مقدار مطلوب y_1 برابر با ۰/۲ و مقدار مطلوب y_2 برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.

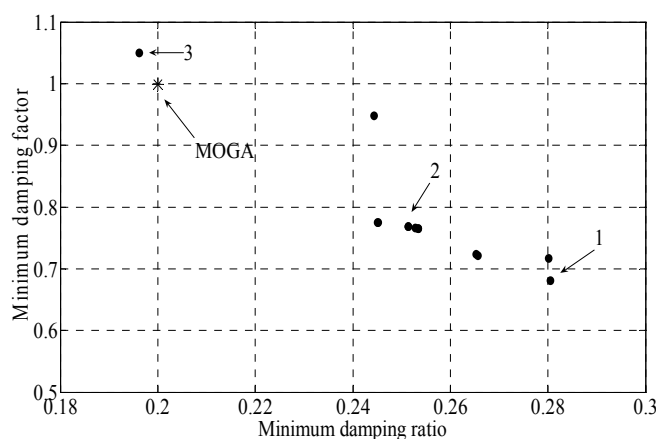
$$y = \text{Minimize} : (10 \times (y_1 - 0.2)^2 + (y_2 - 1)^2)$$

شکل ۷-۱۴ Pareto-front سیستم TAFM حاصل از SPEA را در مقایسه با روش وزن دهی توابع هدف نمایش می دهد. همانطور که از این شکل قابل ملاحظه است، رنج تغییرات Pareto-front در مقایسه با روش طراحی در حوزه زمان بیشتر و در مقایسه با سیستم SMIB (شکل ۷-۱۲) کمتر می باشد. همچنین طراحی حاصل از MOGA جزو Pareto-front است که البته همیشه اینگونه نیست. در اینجا ذکر چند نکته ضروری به نظر می رسد:

۱- استفاده از روش مجموع وزن دهی توابع هدف مشکلاتی مانند یافتن مقدار بهینه برای وزن ها و مقدار مطلوب برای توابع هدف را دارد. از طرفی ما در امر بهینه سازی با وزن دهی و در نظر گرفتن مقدار برای توابع هدف دخالت می کنیم. مشکلات فوق الذکر در روش های مبتنی بر تئوری بازی وجود ندارند.

۲- Pareto-front به جای یک جواب بهینه چندین پاسخ می دهد و دست طراح را در انتخاب جواب دلخواه باز می گذارد.

در ادامه همانند سیستم SMIB به منظور تحلیلی بیشتر، سه طراحی با موقعیت های مختلف از Pareto-front انتخاب شده و مقدار عددی پارامترهای آن ها در جدول ۷-۱۱ آورده شده اند.

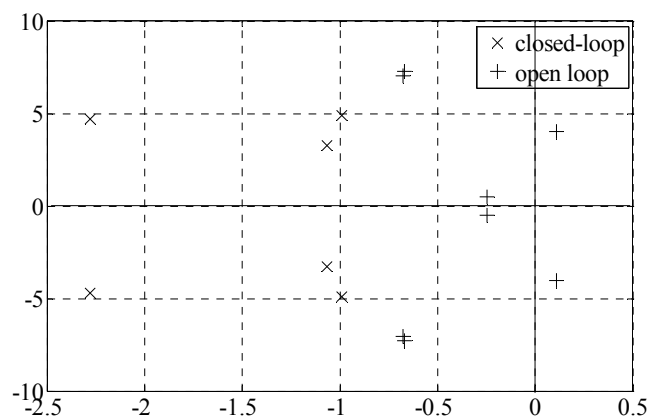


شکل (۷-۱۴) Pareto-front سیستم TAFM در مقایسه با روش وزن دهی توابع هدف

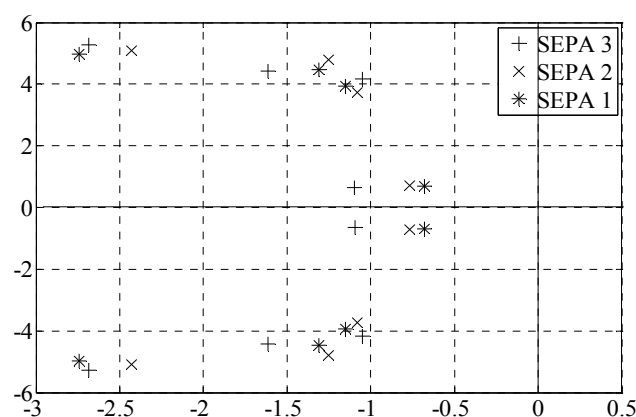
جدول (۷-۱۱) مشخصات PSS های انتخاب شده و MOGA

پارامترها	SPEA 1	SPEA 2	SPEA 3	MOGA
T_1	۰/۵۳	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۴۸
T_2	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵
T_3	۱	۱	۱/۵	۷/۴
T_4	۳/۵	۲/۸۶	۳/۴۶	۸/۷
V_{Smax}	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
K_{PSS}	۳۵/۴	۳۵/۳	۳۸/۱	۱۶/۶

شکل های ۷-۱۵ و ۷-۱۶ قطب های غالب سیستم TAFM را به ترتیب با پایدارسازهای طراحی شده توسط MOGA و SPEA نمایش می دهند. همانطوری که از شکل ۷-۱۵ نیز بر می آید، این سیستم قدرت بدون PSS ناپایدار می باشد.



شکل (۷-۱۵) قطب های نوسانی غالب سیستم TAFM با پایدارساز MOGA



شکل (۷-۱۶) قطب های نوسانی غالب سیستم TAFM با پایدارسازهای منتخب

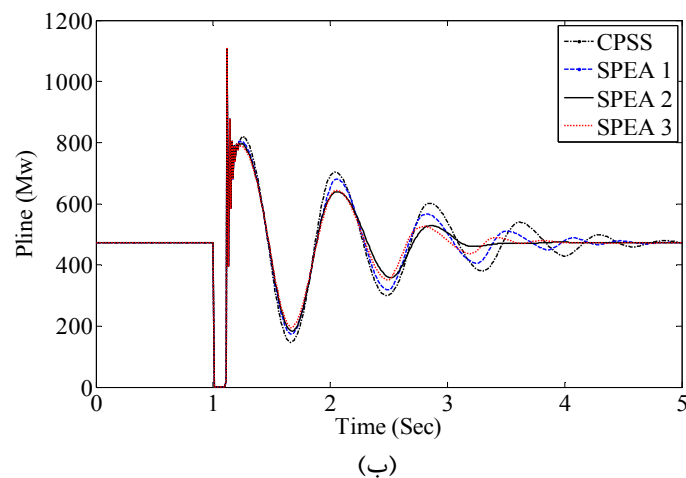
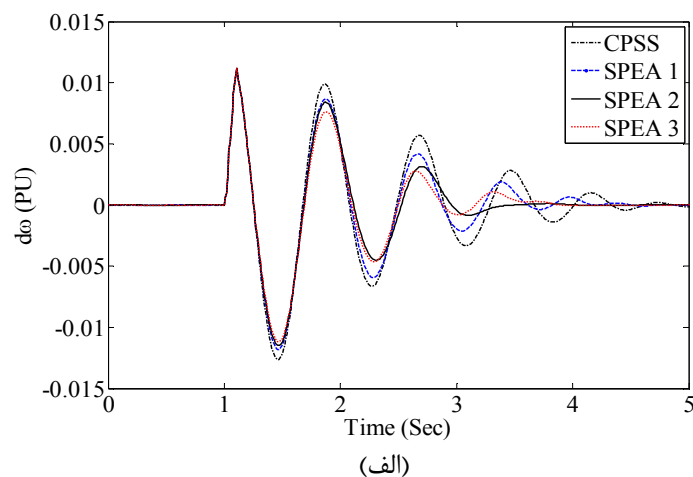
جدول ۷-۱۲ فرکانس و نسبت میرایی مدهای الکترومکانیکی سیستم TAFM را نمایش می دهد. این مدهای مکانیکی شامل دو مد محلی و یک مد بین ناحیه ای می باشند. برای سنجش پایداری و نحوه عملکرد پایدارسازهای طراحی شده، مطابق جدول ۷-۱۳ به هرکدام از سیستم ها یک خطای سه فاز به زمین اعمال گردیده و انحراف سرعت زاویه ای روتور و توان انتقالی خط بر حسب زمان رسم گردیده اند.

جدول (۷-۱۲) فرکانس و نسبت میرایی مدهای الکترومکانیکی TAFM در حالت های مختلف

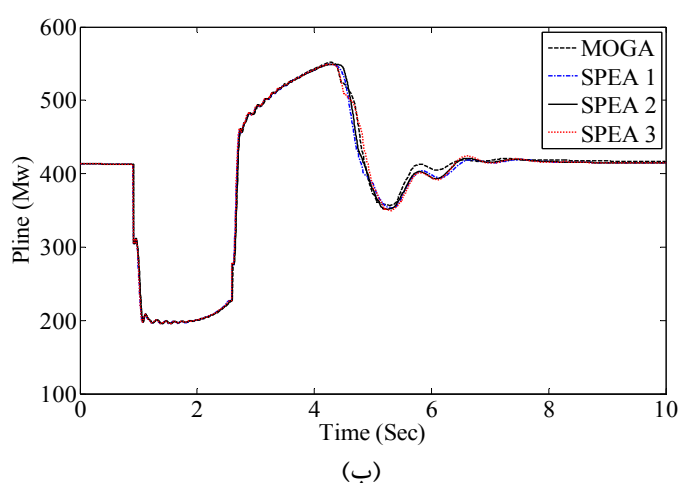
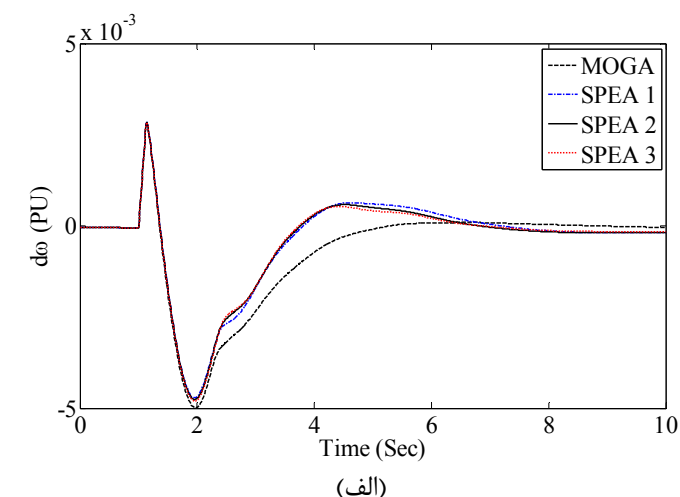
نوع PSS	مد ناحیه ۱		مد ناحیه ۲		مد بین ناحیه ای	
	f	ξ	f	ξ	f	ξ
No PSS	۱/۱۲	۰/۰۹۵	۱/۱۵	۰/۰۹	۰/۶۴	-۰/۰۲۶
MOGA	۰/۷۵	۰/۴	۰/۷۷	۰/۲	۰/۵۲	۰/۳
SPEA 1	۰/۷۱	۰/۲۸	۰/۷۹	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۲۸
SPEA 2	۰/۷۶	۰/۲۵	۰/۸۳	۰/۴۱	۰/۵۹	۰/۲۸
SPEA 3	۰/۷	۰/۳۴	۰/۸۴	۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۲۴

جدول (۷-۱۳) لیست خطاهای اعمال شده به سیستم ها جهت ارزیابی PSS دلتا-امگا

سیستم	شرح
SMIB	اعمال خطای سه فاز به زمین به شین نیروگاه به مدت ۶ سیکل
TAFM	اعمال خطای سه فاز به زمین به شین نیروگاه به مدت ۸ سیکل به شین ۱



شکل (۷-۱۷) اعمال خطای سه فاز به سیستم SMIB. الف) منحنی تغییرات انحراف سرعت زاویه ای روتور ب) منحنی تغییرات توان انتقالی خط



شکل (۷-۱۸) اعمال خطای سه فاز به سیستم TAFM. الف) منحنی تغییرات انحراف سرعت زاویه ای روتور G_1 (ب) منحنی تغییرات توان انتقالی خط

با دقت در شکل ۷-۱۷ در می یابیم که پایدارسازهای طراحی شده با الگوریتم SPEA تحت اغتشاش اعمالی عملکرد تقریباً مشابهی دارند و همگی بهتر از CPSS هستند. همچنین شکل ۷-۱۸ نیز نشان می دهد که پایدارسازهای SPEA و MOGA (که جزوی از Pareto-front بود) در خطای فوق الذکر عملکرد بسیار نزدیک به هم دارند. پایداری سیستم های قدرت در هر دو شکل واضح است. بنابر این با توجه به عملکرد مشابه PSS های طراحی شده با SPEA در سیگنال بزرگ، طراح می تواند با توجه به تفاوت عملکرد آن ها در سیگنال کوچک به طور دلخواه یکی را به عنوان طراحی مورد علاقه برگزیده و به کارگیرد.

فصل هشتم

جمع بندی و پیشنهادات

۸-۱) جمع بندی

در فصل ۱ مقدمه ای در مورد تاریخچه پیدایش PSS و کاربرد آن توضیح داده شد. همچنین کارهای انجام گرفته در این پروژه به طور مختصر بیان گردید. فصل دوم مفاهیم مربوط به پایداری سیستم های قدرت و طبقه بندی های مربوط به آن را ارائه کرد. همچنین نوسانات الکترومکانیکی و انواع آن ها همراه با شکل شرح داده شدند. در ادامه نحوه عملکرد ژنراتور در اغتشاشات گذرا بررسی و مدل مناسب برای آن استخراج گردید. ارائه این فصل با توجه به این که شامل مفاهیم پایه پایداری سیستم های قدرت بود ضروری به نظر می رسید. فصل سوم نیز شامل مفاهیم پایه کنترل خطی که در سیستم قدرت استفاده می شوند به همراه یک مثال ساده بود. در فصل چهارم روش کلاسیک PSS که مبتنی بر خطی سازی بود به همراه مفاهیم مربوطه شرح داده شد. طراحی PSS دلتا-امگا و PSS4B به عنوان پایدارسازهای کلاسیک و نوین به روش تئوری بازی مورد نظر این پایان نامه بود. این کار روی سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت و دو ناحیه ای ۴ ماشینه کندور انجام گردید. ساختار این سیستم ها به همراه دو PSS مذکور در فصل پنجم به طور مفصل تشریح گردید. در فصل ششم تئوری بازی به عنوان یکی از مهم ترین بخش های این پایان نامه بررسی شد و در نهایت فصل هفتم شامل نتایج طراحی PSS برای سیستم های قدرت مورد نظر بود.

۸-۲) پیشنهادات

برای ادامه این پروژه موارد زیر توصیه می شود:

- در نظر گرفتن توابع هدف بیشتر برای طراحی PSS و همچنین تست روش طراحی روی سیستم های با تعداد ژنراتور بیشتر.
- مقایسه روش ارائه شده در این پروژه با روش های بیشتر.
- اعمال طراحی بهینه با روش تئوری بازی ها به زمینه های دیگر سیستم قدرت.

ضمیمہ ہا

جدول (۱) فهرست نمادها

نماد	شرح
φ_d, φ_q	d- and q-axis stator flux linkages
i_d, i_q	d- and q-axis stator terminal currents
V_d, V_q	The d-axis and the q-axis voltage
i'_{fd}	The field current referred to the stator
$i'_{kd}, i'_{kq1}, i'_{kq2}$	The d-axis current and the q-axis currents. All these values are referred to the stator
V'_{fd}	The field voltage referred to the stator
$V'_{kd}, V'_{kq1}, V'_{kq2}$	The d-axis voltage and the q-axis voltages. All these values are referred to the stator
φ'_{fd}	The field flux linkage referred to the stator
$\varphi'_{kd}, \varphi'_{kq1}, \varphi'_{kq2}$	The d-axis flux linkage and the q-axis flux linkages. All these values are referred to the stator
r_s	The stator resistance
r'_{fd}	The field resistance referred to the stator.
$r'_{kd}, r'_{kq1}, r'_{kq2}$	The d-axis resistance and the q-axis resistances. All these values are referred to the stator.
ω	Mechanical speed deviation of the rotor
T_M, T_E	Mechanical and electrical torques respectively
K_d	The damping factor
H	The inertia constant

جدول (۲) مشخصات خطوط

پارامتر	SMIB	TAFM
Nominal Voltage	400KV	230KV
Resistance (pu/Km)	0.017	0.0001
Inductance (pu/Km)	0.0009	0.001
Capacitance (pu/Km)	0	0.00175

جدول (۳) مشخصات بارها

پارامتر	TAFM
L₁	967MW, 100MVAR, -187MVAR
C₁	-200MVAR
L₂	1767MW, 100MVAR, -187MVAR
C₂	-350MVAR

جدول (۴) پارامترهای ژنراتورهای سنکرون

پارامتر	SMIB	TAFM
Rotor Type	Salient-pole	Round
Number of Poles	64	8
Nominal Power	500 MVA	900 MVA
Line to Line Voltage (RMS)	13.8 kV	20 kV
Frequency	50 Hz	60 Hz
Reactances (pu)		
X_d	1.305	1.8
X'_{d0}	0.296	0.3
X''_{d0}	0.252	0.25
X_q	0.474	1.7
X'_{q0}		0.55
X''_{q0}	0.283	0.25
X_l	0.18	0.2
Time Constants (s)		
T'_{d0}	1.01	8
T''_{d0}	0.053	0.03
T'_{q0}		0.4
T''_{q0}	0.1	0.05
Stator Resistance (pu)	0.0028544	0.0025
Inertia Factor	3.7	6.5 (G_1 & G_2) 6.175 (G_3 & G_4)
Friction Factor	0	0

جدول (۵) مشخصات توربین هیدرولیک و گاورنر

پارامتر	Value
Governor	
Permanent Droop	0.05
Servo Motor	
K_A	3.33
T_A (s)	0.07
Speed Limit (pu)	[-0.1, 0.1]
PID Regulator	
K_P	1.163
K_I	0.105
K_D	0.01
Hydraulic Turbine	
β	0
T_W (s)	2.67
G_T	1

جدول (۶) مشخصات توربین بخار و گاورنر

پارامتر	Value
Regulator	
Gain (K_p)	1
Perm droop	
$R_p(\text{pu})$	0.05
Speed Relay and Servo motor	
Time constants	
$[T_{sr} \ T_{sm}]$	[0.001 0.15]
Time Constants	
$[T_{CH} \ T_{RH1} \ T_{RH2} \ T_{CO}]$	[0 10 3.3 0.5]
Turbine Fractions	
$[F_{VHD} \ F_{HP} \ F_{IP} \ F_{LP}]$	[0 0.36 0.36 0.28]

جدول (۷) مشخصات سیستم تحریک

پارامتر	SMIB	TAFM
Low pass Filter Time Constant (T_R)	0.002	0.002
Regulator		
Gain (K_A)	200	200
Time Constant (T_A)	0.001	0.001
Exciter		
Gain (K_E)	1	1
Time Constant (T_E)	0	0
Lag-Lead Compensator		
T_B	0	0
T_C	0	0
Damping Filter		
Gain (K_F)	0.001	0
Time Constant (T_F)	0.1	0

جدول (۸) مشخصات ترانسفورماتورها

پارامتر	SMIB	TAFM
Nominal Power	500 MVA	900 MVA
Frequency	50 Hz	60 Hz
Winding 1		
Connection	Δ	Δ
Phase-Phase Voltage (RMS)	13.8 kV	20 kV
Resistance (pu)	0.002	0.000001
Inductance (pu)	0	0
Winding 2		
Connection	Y_g	Y_g
Phase-Phase Voltage (RMS)	400 kV	230 kV
Resistance (pu)	0.002	0.000001
Inductance (pu)	0.12	0.15
Magnetizing Resistance (pu)	500	500
Magnetizing Reactance (pu)	500	500

- [1] B. Pal, B. Chaudhuri. Robust control in power systems; Springer Science & Business Media Inc, 2005.
- [2] K. Sundareswaran, S. Razia Begum. Genetic tuning of a power system stabilizer. European Transactions on Electrical Power 2004; 14:151-160. DOI: 10.1002/etep.11.
- [3] M. M. Pedram, H. Seifi. Extended algorithm of a fuzzy-set based power-system stabilizer with genetic algorithm timing. European Transactions on Electrical Power 1997; 7: 205-210. DOI: 10.1002/etep.4450070309.
- [4] R. Huwer, P. Kocher, D. Nelles, M. Wache. Design of a linear robust PSS for optimal damping of multimode-oscillations. European Transactions on Electrical Power 1996; 1: 67-70. DOI: 10.1002/etep.4450060110.
- [5] T. I. Maris, A. D. Lygdis, N. A. Vovos, G. B. Giannakopoulos. Stabilizers enhancing the frequency regulation action of HVDC links supplying weak AC systems. European Transactions on Electrical Power 1993; 3: 201-212. DOI: 10.1002/etep.4450030303.
- [6] R. Grondin, I. Kamwa, G. Trudel, J. Taborda, R. Lenstroem, L. Gerin-Lajoie, J. P. Gingras, M. Racine, and H. Baumberger. The multi-band PSS: A flexible technology designed to meet opening markets. In Proceeding CIGRÉ 2000; 39-201.
- [7] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Standard 421.5-2005.
- [8] E. Zitzler and L. Thiele. Multiobjective evolutionary algorithms: a Comparative case study and the strength Pareto approach. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 1999; 3: 257-271. DOI: 10.1109/4235.797969.
- [9] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 2002; 6: 182-197. DOI: 10.1109/4235.996017.
- [10] M. Sefrioui, J. Periaux. Nash genetic algorithms: examples and applications. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation 2000; 1: 509 – 516. DOI: 10.1109/CEC.2000.870339
- [11] Leonard L. Grigsby, Power system stability and control 2006 by Taylor & Francis Group, LLC.

[۱۲] کاظمی ا، (۱۳۸۲) "سیستم های قدرت الکتریکی"، جلد دوم، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت.

[۱۳] کراری م، (۱۳۸۲) "دینامیک و کنترل سیستم های قدرت" مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[14] M. A. Pai, Power System Stability, North-Holland Publishing Company, 1981.

[15] P. Kundur, Power System Stability and Control; McGraw-Hill: New York, 1994.

[16] I. Kamwa, R. Grondin and G. Trudel, IEEE PSS2B versus PSS4B: The limits of performance of modern power system stabilizers. IEEE Transactions on Power Systems 2005; 20: 903-915. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846197.

[17] M. Kashki, A. Gharaveis, F. Kharaman. Application of CDCARLA technique in designing takagi-sugeno fuzzy logic power system stabilizer, IEEE International Power and Energy Conference, pp. 280 – 285, Nov. 2006.

[18] IEEE Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, Hydraulic turbine and turbine control models for dynamic studies, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 7, pp. 167-179. 1992.

[19] IEEE committee report. Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1973; PAS-92:1904-1915. DOI: 10.1109/TPAS.1973.293570.

[20] Theodore L. Turocy, Bernhard von Stengel, Game Theory, CDAM Research Report LSE-CDAM-2001-09, October 8, 2001.

[21] Binmore and Vulkan, "Applying game theory to automated negotiation," Netnomics Vol. 1, pp 1–9, 1999.

[22] N. Srinivas and K. Deb. Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms, *Evol. Comput.* Vol. 2, No.3, pp. 221–248, Fall 1995.

[23] M. Klein, G. J. Rogers, S. Moorthy, and P. Kundur. Analytical investigation of factors influencing power system stabilizer performance. IEEE Transactions on Energy Conversion 1992; 7: 382–390. DOI: 10.1109/60.148556.

[24] Y. L. Abdel-Magid, and M. A. Abido, Optimal multi-objective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms. IEEE Transactions on power systems, Vol. 18, No. 3, AUGUST 2003.

Abstract:

Power System Stabilizers (PSS) have very important role in power system, so their design methodology has been interesting issue for writing many papers in last decades. Conventional method of PSS design is time-consuming while the methods which are based on single objective optimization or assign a weight to objective have some problems. The present work, discusses some new and fast methods for PSS design which are game theory based multi-objective approaches. In the first method minimization of the values of the settling time and amplitude variations of a response are taken as the goals or two objectives function when designing the PSS parameters. In the second approach, maximization of the minimum damping factor and minimum damping ratio of the system's dominant oscillatory modes are two objectives. SPEA and NSGA-II are the methods which use cooperative game concepts and generate a set of optimal parameters called Pareto-optimal set. This provides an excellent negotiation opportunity for the system manager, manufacturer of the PSS and costumers to pick out the desired PSS from a set of optimally designed PSSs. Another approach is Nah GA which is based on non-cooperative game and gives an optimal design known as Nash equilibrium. The proposed approaches are implemented and examined in two familiar systems; two-area four machine system of Kundor and a single machine infinite bus system. Different faults are applied to the systems with optimal PSSs and a comparison between the proposed method and other techniques are given which is interesting.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Optimization of Voltage and Frequency Controller in the Multi-machine System Using Multi-objective Optimization of Game Theory

By:

Hossein Yassami

Under Supervision of:

Dr. Ahmad Darabi

Consultant:

Dr. Mohammad-Reza Rafiei

A thesis submitted to the Faculty of Electrical and Robotic Engineering
Shahrood University of Technology in partial fulfillment of the
requirements for the degree of the Master of Science in electrical
engineering

June 2009