

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



طراحی کنترل کننده هوشمند بار- فرکانس فازی به روش ABC در
سیستم قدرت تجدید ساختار یافته

استادان راهنما

دکتر خلیل ولی پور

دکتر حسین شایقی

استاد مشاور

مهندس حرمت الله فیروزی

توسط:

نادر حقی

دانشگاه محقق اردبیلی

شهریور ۱۳۹۰



طراحی کنترل کننده هوشمند بار- فرکانس فازی به روش ABC در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته

توسط:

نادر حقی

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق- قدرت

از

دانشگاه

محقق اردبیلی

اردبیل- ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه:

دکتر خلیل ولی پور (استاد راهنما و رئیس کمیته) استادیار

دکتر حسین شایقی (استاد راهنما و رئیس کمیته) دانشیار

دکتر عادل اکبری مجد (داور داخلی) استادیار

مهندس حرمت الله فیروزی (استاد مشاور) مربی

شهریور ۱۳۹۰

تقدیم به

مادر فداکارم

و

پدر دلسوزم

و

همسر مهربانم

با سپاس فراوان از زحمات بی‌دریغ اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر ولی‌پور و آقای دکتر شایقی و مهندس حرمت الله فیروزی که بدون رهنمودهای ایشان انجام این پایان‌نامه میسر نبود.

و همچنین از زحمات تمام اساتیدی که در تمام مراحل از زحمت‌های بی‌دریغشان من را یاری فرمودند نهایت تشکر و قدردانی را دارم. از دوستان عزیزم، دکتر وحید علیزاده فرد، مهندس محمد سلطانی نژاد، مهندس رضا ایل بیگی و مهندس علی داور سپاسگذارم و برایشان آروزی توفیق روز افزون دارم.

چکیده

با بوجود آمدن تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، تغییرات اساسی در نظام مدیریت شبکه‌های برق و بهره برداری از آن بوجود آمده است. یکی از مسایل مهم در محیط تجدید ساختار یافته تامین سرویس‌های جانبی می‌باشد. در ساختار جدید، سرویس‌های جانبی بعنوان یک کالای تجاری محسوب می‌شوند. از جمله مهمترین این سرویس‌های جانبی کنترل بار-فرکانس (LFC) است. یکی از مهم‌ترین مسایل در LFC طراحی کنترل‌کننده‌ای است که با وجود عدم قطعیت‌های مختلف سیستم و قراردادهای مختلف بین کمپانی‌های تولید و مصرف مختلف، پاسخ دینامیکی بهینه‌ای داشته باشد.

فرایند طراحی کنترل‌کننده‌هایی که در پایان نامه انجام شده است عبارت است از:

۱- در ابتدا در شرایط مختلف (نقاط کار مختلف) کنترل‌کننده‌های PID معمولی طراحی شده و سپس با استفاده از اطلاعات کنترل‌کننده‌های PID به دست آمده برای آموزش دادن ANFIS استفاده شده است، بدین ترتیب کنترل‌کننده PID تطبیقی (PID فازی از نوع سوگنو) طراحی شده که ضرایب آن در شرایط کاری مختلف به صورت تطبیقی تغییر می‌کنند. همچنین کارایی آن با PID معمولی مقایسه گردیده است.

۲- در این پایان نامه یک ساختار جدید کنترل‌کننده PID فازی ترکیبی ارایه و پارامترهای آن برای بهبود نوسانات فرکانس سیستم قدرت تحت شرایط کاری مختلف بهینه می‌شود.

نتایج به دست آمده از کنترل‌کننده پیشنهادی در این پایان نامه به خوبی پاسخگوی عملکرد سیستم LFC می‌باشد. همچنین دینامیک سیستم با اعمال این کنترل‌کننده به طور چشمگیری بهبود یافته است.

تعیین ضرایب کنترل‌کننده PID و تعیین ساختار توابع عضویت در کنترل‌کننده پیشنهادی توسط الگوریتم ABC انجام می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

کنترل بار-فرکانس تجدید ساختار یافته، کنترل‌کننده PID، الگوریتم ABC، PID فازی ترکیبی.

فهرست مطالب

صفحه	ردیف	عنوان
۱		فصل اول- مقدمه و معرفی مفاهیم کلی کنترل بار فرکانس و مروری بر کارهای انجام شده
۱	۱-۱	مفاهیم کلی کنترل بار- فرکانس
۳	۲-۱	مفاهیم حلقه‌های کنترلی فرکانس
۳	۳-۱	کنترل بار فرکانس در سیستم قدرت تک ناحیه‌ای
۵	۴-۱	کنترل بار فرکانس در سیستم قدرت چندناحیه‌ای
۸	۵-۱	ضرایب مشارکت در LFC
۱۰	۶-۱	محدودیت‌های فیزیکی در LFC
۱۰	۱-۶-۱	باند راکد گاورنر سرعت (GDB)
۱۱	۲-۶-۱	محدودیت نرخ تولید (GRC)
۱۲	۳-۶-۱	بویلر
۱۳	۷-۱	کنترل فرکانس در محیط تجدید ساختاریافته
۱۶	۸-۱	مروری بر کارهای انجام شده در این زمینه
۲۱	۹-۱	جمع بندی
		فصل دوم- معرفی و ارزیابی الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC) و طراحی کنترل کننده
۲۲		پیشنهادی PID فازی ترکیبی توسط ABC
۲۲	۱-۲	رفتار زنبورهای عسل در طبیعت برای غذایابی
۲۴	۲-۲	الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی
۳۱	۳-۲	معرفی توابع تست جهت ارزیابی الگوریتم ABC
۳۱	۱-۳-۲	تابع تست اسفیر
۳۱	۲-۳-۲	تابع تست راستریگین
۳۲	۳-۳-۲	تابع تست گرینونک
۳۳	۴-۳-۲	تابع تست رزنبوک

۳۳	۲-۳-۵ تابع تست آکلی
۳۴	۲-۴ ارزیابی الگوریتم ABC روی توابع تست اشاره شده
۴۴	۲-۵ ساختار یک کنترل کننده فازی
۴۴	۲-۵-۱ پیش پردازنده
۴۵	۲-۵-۲ فازی ساز
۴۵	۲-۵-۳ موتور استنتاج
۴۵	۲-۵-۴ قواعد فازی
۴۶	۲-۵-۵ غیر فازی ساز
۴۶	۲-۵-۵-۱ روش مرکز ثقل
۴۷	۲-۵-۵-۲ روش میانگین وزن دار
۴۷	۲-۵-۶ پس پردازش
۴۸	۲-۶ انواع استدلال فازی
۴۸	۲-۶-۱ روش ممدانی
۴۹	۲-۶-۲ روش سوگنو
۴۹	۲-۶-۲-۱ سوگنو نوع صفر
۵۰	۲-۶-۲-۲ سوگنو نوع یک
۵۱	۲-۷ طراحی کنترل کننده پیشنهادی PID فازی ترکیبی (HFPIID)
۵۴	۲-۸ جمع بندی
۵۶	فصل سوم- نتایج
۵۷	۳-۱ سیستم دو ناحیه‌ای با واحدهای حرارتی
۵۷	۳-۱-۱ مدلسازی و جزئیات سیستم دو ناحیه‌ای با واحدهای حرارتی
۵۹	۳-۱-۱-۱ سناریوی ۱: قراردادهای بر اساس حوضچه‌های برق
۵۹	۳-۱-۱-۲ سناریوی ۲: قراردادهای بر اساس ترکیب حوضچه‌های برق و قراردادهای دوجانبه
۶۰	۳-۱-۱-۳ سناریوی ۳: تخطی قرارداد

۶۰	۲-۱-۳ تابع هدف مناسب جهت طراحی کنترل کننده LFC
۶۲	۳-۱-۳ بررسی تاثیرات عوامل غیر خطی
۶۲	۱-۳-۱-۳ محدودیت GRC
۶۵	۲-۳-۱-۳ محدودیت GDB
۶۶	۴-۱-۳ طراحی و آموزش دادن کنترل کننده PID فازی
۶۷	۵-۱-۳ طراحی و کنترل کننده PID فازی ترکیبی (HFPIID) برای سیستم دو ناحیه‌ای حرارتی
۶۸	۶-۱-۳ نتایج شبیه سازی‌های سیستم دو ناحیه‌ای حرارتی
۷۵	۲-۳ سیستم دو ناحیه ای با واحدهای آبی - حرارتی
۸۰	۳-۳ سیستم سه ناحیه ای با واحدهای حرارتی
۸۷	فصل چهارم - بحث
۸۸	۱-۴ نتیجه گیری
۸۹	۲-۴ پیشنهادات
۹۰	منابع

فهرست تصاویر

صفحه	عنوان	ردیف
	فصل اول	
۴	شکل ۱-۱ بلوک دیاگرام مدل تولید- بار	
۴	شکل ۲-۱ بلوک دیاگرام حلقه کنترل بار فرکانس	
۵	شکل ۳-۱ بلوک دیاگرام سیستم توربین- گاورنر برای یک واحد بخار (بدون بازگرم‌کن)	
۵	شکل ۴-۱ مدل بلوک دیاگرام گاورنر با حلقه‌های کنترل فرکانس برای واحد بخار بدون بازگرم‌کن	
۶	شکل ۵-۱ معادل سیستم چند توربو ژنراتوری (چند ماشینه)	
۷	شکل ۶-۱ بلوک دیاگرام تغییر توان خط ارتباطی ناحیه i در سیستم قدرت N ناحیه‌ای	
۸	شکل ۷-۱ بلوک دیاگرام ناحیه کنترلی i	
۹	شکل ۸-۱ بلوک دیاگرام ناحیه کنترلی i با کنترل تکمیلی	
۹	شکل ۹-۱ سیستم LFC با انواع مختلف تولید و ضرایب مشارکت در ناحیه i	
۱۰	شکل ۱۰-۱ باند راکد گاورنر سرعت	
۱۱	شکل ۱۱-۱ مدل‌های غیرخطی توربین با در نظر گرفتن GRC	
۱۱	شکل ۱۲-۱ مدل‌های غیرخطی توربین دارای بازگرم‌کن با در نظر گرفتن GRC	
۱۱	شکل ۱۳-۱ مدل‌های غیرخطی توربین آبی دارای در نظر گرفتن GRC	
۱۲	شکل ۱۴-۱ مدل‌های گاورنرهای آبی: الف) گاورنر مکانیکی ب) گاورنر الکتریکی	
۱۲	شکل ۱۵-۱ بلوک دیاگرام بویلر	
۱۳	شکل ۱۶-۱ بلوک دیاگرام کامل توربین و گاورنر شامل بویلر	
۱۵	شکل ۱۷-۱ طرح کلی LFC در محیط تجدیدساختاریافته	
۱۷	شکل ۱۸-۱ منطقه D شکل در نیم فضای S	
۲۰	شکل ۱۹-۱ بلوک دیاگرام واحد دیزل	
	فصل دوم	
۲۸	شکل ۱-۲ (شبه کد) الگوریتم ABC	

۲۹	شکل ۲-۲ فلوجارت الگوریتم ABC
۳۰	شکل ۳-۲ رفتار کاوشی زنبور عسل برای یافتن غذا (شاهد)
۳۱	شکل ۴-۲ تابع اسفیر
۳۲	شکل ۵-۲ تابع راستریگین
۳۲	شکل ۶-۲ تابع گرینونک
۳۳	شکل ۷-۲ تابع رزنبوک
۳۳	شکل ۸-۲ تابع آکلی
۴۲	شکل ۹-۲. نمودار همگرایی تابع اسفیر
۴۲	شکل ۱۰-۲ نمودار همگرایی تابع راستریگین
۴۲	شکل ۱۱-۲ نمودار همگرایی تابع گرینونک
۴۳	شکل ۱۲-۲ نمودار همگرایی تابع رزنبوک
۴۳	شکل ۱۳-۲ نمودار همگرایی تابع آکلی
۴۴	شکل ۱۴-۲ ساختار بلوکی کنترل کننده فازی
۴۵	شکل ۱۵-۲ چند نوع فاز ساز معروف و رایج
۴۷	شکل ۱۶-۲ مثالی از روش مرکز ثقل
۴۷	شکل ۱۷-۲ مثالی از روش میانگین وزن دار
۴۸	شکل ۱۸-۲ تقسیم بندی روش های استدلال فازی
۴۸	شکل ۱۹-۲ کنترل کننده فازی با ۲ ورودی و ۱ خروجی
۴۸	شکل ۲۰-۲ شکل توابع عضویت ورودی ها و خروجی (روش ممدانی)
۵۰	شکل ۲۱-۲ شکل توابع عضویت ورودی ها (روش سوگنو)
۵۱	شکل ۲۲-۲ کنترل کننده PID فازی ترکیبی (HFPIID)
۵۳	شکل ۲۳-۲ فلوجارت کلی الگوریتم ABC برای یافتن پارامترهای کنترل کننده HFPIID
۵۴	شکل ۲۴-۲ ساختار کنترلی ABC-HFPIID پیشنهادی

فصل سوم

- شکل ۳-۱ مدل غیر خطی هر GENCO شامل توربین دارای بازگرم‌کن و GRC در سیستم دو ناحیه‌ای حرارتی ۵۷
- شکل ۳-۲ فرآیند بازار برای سیستم کنترل بار-فرکانس ۵۸
- شکل ۳-۳ طرح کلی سیستم LFC تجدید ساختار یافته دو ناحیه‌ای ۵۸
- شکل ۳-۴ مقایسه پاسخ‌های فرکانسی دو ناحیه سیستم با استفاده از توابع معیار f_{ITAE} ، f_{ITSE} و f_{FDM} ۶۲
- شکل ۳-۵ سه روش اعمال کردن GRC ۶۲
- شکل ۳-۶ الف انحرافات فرکانسی ناحیه ۱ با GRC های ۱، ۸، ۶ و ۵ درصد با بکار بردن مدل ۱ ۶۳
- شکل ۳-۶ ب انحرافات فرکانسی ناحیه ۱ با GRC های ۴ و ۳ درصد با بکار بردن مدل ۱ ۶۳
- شکل ۳-۷ انحرافات فرکانسی ناحیه ۱ با GRC های مختلف با بکار بردن مدل ۲ ۶۳
- شکل ۳-۸ انحرافات فرکانسی ناحیه ۱ (در سناریوی ۳) با GRC های مختلف با بکار بردن مدل ۳ ۶۴
- شکل ۳-۹ نمودار نرخ تغییرات توان توربین ۱ در ناحیه اول، با اعمال مدل ۱ و $GRC=5\%$ ۶۴
- شکل ۳-۱۰ نمودار نرخ تغییرات توان توربین ۱ در ناحیه اول، با اعمال مدل ۲ و $GRC=5\%$ ۶۴
- شکل ۳-۱۱ نمودار نرخ تغییرات توان توربین ۱ در ناحیه اول، با اعمال مدل ۳ و $GRC=5\%$ ۶۴
- شکل ۳-۱۲ الف مدل غیر خطی هر GENCO شامل توربین دارای بازگرم‌کن و GRC و GDB نوع ۱ ۶۴
- شکل ۳-۱۲ ب مدل غیر خطی هر GENCO شامل توربین دارای بازگرم‌کن و GRC و GDB نوع ۲ ۶۵
- شکل ۳-۱۳ انحرافات فرکانسی ناحیه ۱ با GRC مختلف، بدون GDB، --- GDB نوع ۱، .. GDB نوع ۲ ۶۵
- شکل ۳-۱۴ پاسخ فرکانسی دو ناحیه سیستم، --- HFPID، --- ANFIS، .. PID، سناریوی ۱ ۶۸
- شکل ۳-۱۵ تغییر توان خروجی GENCO های ناحیه ۱، --- HFPID، --- ANFIS، .. PID، سناریوی ۱ ۶۸
- شکل ۳-۱۶ تغییر توان خروجی GENCO های ناحیه ۲، --- HFPID، --- ANFIS، .. PID، سناریوی ۱ ۶۹
- شکل ۳-۱۷ تغییر توان انتقالی سیستم، --- HFPID، --- ANFIS، .. PID، سناریوی ۱ ۶۹
- شکل ۳-۱۸ سیگنال کنترلی، --- HFPID، --- ANFIS، .. PID، سناریوی ۱ ۶۹
- شکل ۳-۱۹ پاسخ فرکانسی دو ناحیه سیستم، --- HFPID، --- ANFIS، .. PID، سناریوی ۲ ۷۰
- شکل ۳-۲۰ تغییر توان خروجی GENCO های ناحیه ۱، --- HFPID، --- ANFIS، .. PID، سناریوی ۲ ۷۰
- شکل ۳-۲۱ تغییر توان خروجی GENCO های ناحیه ۲، --- HFPID، --- ANFIS، .. PID، سناریوی ۲ ۷۰

- شکل ۳-۲۲ تغییر توان انتقالی سیستم، — HFPID، — ANFIS، — PID، سناریوی ۲ ۷۱
- شکل ۳-۲۳ سیگنال کنترلی، — HFPID، — ANFIS، — PID، سناریوی ۲ ۷۱
- شکل ۳-۲۴ پاسخ فرکانسی دو ناحیه سیستم، — HFPID، — ANFIS، — PID، سناریوی ۳ ۷۱
- شکل ۳-۲۵ تغییر توان خروجی GENCO های ناحیه ۱، — HFPID، — ANFIS، — PID، سناریوی ۳ ۷۲
- شکل ۳-۲۶ تغییر توان خروجی GENCO های ناحیه ۲، — HFPID، — ANFIS، — PID، سناریوی ۳ ۷۲
- شکل ۳-۲۷ تغییر توان انتقالی سیستم، — HFPID، — ANFIS، — PID، سناریوی ۳ ۷۲
- شکل ۳-۲۸ سیگنال کنترلی، — HFPID، — ANFIS، — PID، سناریوی ۳ ۷۳
- شکل ۳-۲۹ مقایسه میزان شاخص FDM برای کنترل کننده‌ها با وجود %PPC نایقینی (سناریو ۳) ۷۳
- شکل ۳-۳۰ مقایسه میزان شاخص ITSE برای کنترل کننده‌ها با وجود %PPC نایقینی (سناریو ۳) ۷۵
- شکل ۳-۳۱ مقایسه میزان شاخص ITAE برای کنترل کننده‌ها با وجود %PPC نایقینی (سناریو ۳) ۷۵
- شکل ۳-۳۲ پاسخ فرکانسی دو ناحیه سیستم آبی - حرارتی، — HFPID، — PID، — ANFIS، سناریوی ۱ ۷۶
- شکل ۳-۳۳ تغییر توان انتقالی سیستم آبی - حرارتی، — HFPID، — PID، — ANFIS، سناریوی ۱ ۷۶
- شکل ۳-۳۴ سیگنال کنترلی سیستم آبی - حرارتی، — HFPID، — PID، — ANFIS، سناریوی ۱ ۷۷
- شکل ۳-۳۵ پاسخ فرکانسی دو ناحیه سیستم آبی - حرارتی، — HFPID، — PID، — ANFIS، سناریوی ۲ ۷۷
- شکل ۳-۳۶ تغییر توان انتقالی سیستم آبی - حرارتی، — HFPID، — PID، — ANFIS، سناریوی ۲ ۷۷
- شکل ۳-۳۷ سیگنال کنترلی سیستم آبی - حرارتی، — HFPID، — PID، — ANFIS، سناریوی ۲ ۷۸
- شکل ۳-۳۸ پاسخ فرکانسی دو ناحیه سیستم آبی - حرارتی، — HFPID، — PID، — ANFIS، سناریوی ۳ ۷۸
- شکل ۳-۳۹ تغییر توان انتقالی سیستم آبی - حرارتی، — HFPID، — PID، — ANFIS، سناریوی ۳ ۷۸
- شکل ۳-۴۰ سیگنال کنترلی سیستم آبی - حرارتی، — HFPID، — PID، — ANFIS، سناریوی ۳ ۷۹
- شکل ۳-۴۱ مقایسه میزان شاخص ITAE برای کنترل کننده‌ها با وجود %PPC نایقینی (سیستم آبی - حرارتی) ۷۹
- شکل ۳-۴۲ مقایسه میزان شاخص ITSE برای کنترل کننده‌ها با وجود %PPC نایقینی (سیستم آبی - حرارتی) ۸۰
- شکل ۳-۴۳ مقایسه میزان شاخص FDM برای کنترل کننده‌ها با وجود %PPC نایقینی (سیستم آبی - حرارتی) ۸۰
- شکل ۳-۴۴ سیستم سه ناحیه‌ای ۸۱

- شکل ۳-۴۵ پاسخ فرکانسی و تغییر توان انتقالی خطوط ارتباطی سیستم سه ناحیه‌ای، — HFPID، — PID، .. ۸۲
ANFIS، سناریو ۱
- شکل ۳-۴۶ سیگنال‌های کنترلی سیستم سه ناحیه‌ای، — HFPID، — PID، .. ANFIS، سناریو ۱ ۸۳
- شکل ۳-۴۷ پاسخ فرکانسی و تغییر توان انتقالی خطوط ارتباطی سیستم سه ناحیه‌ای، — HFPID، — PID، .. ۸۳
ANFIS، سناریو ۲
- شکل ۳-۴۸ سیگنال‌های کنترلی سیستم سه ناحیه‌ای، — HFPID، — PID، .. ANFIS، سناریو ۲ ۸۳
- شکل ۳-۴۹ پاسخ فرکانسی و تغییر توان انتقالی خطوط ارتباطی سیستم سه ناحیه‌ای، — HFPID، — PID، .. ۸۳
ANFIS، سناریو ۳
- شکل ۳-۵۰ سیگنال‌های کنترلی سیستم سه ناحیه‌ای، — HFPID، — PID، .. ANFIS، سناریو ۳ ۸۳
- شکل ۳-۵۱ مقایسه میزان شاخص ITAE برای کنترل کننده‌ها با وجود %PPC نایقینی (سیستم سه ناحیه‌ای) ۸۵
- شکل ۳-۵۲ مقایسه میزان شاخص ITSE برای کنترل کننده‌ها با وجود %PPC نایقینی (سیستم سه ناحیه‌ای) ۸۵
- شکل ۳-۵۳ مقایسه میزان شاخص FDM برای کنترل کننده‌ها با وجود %PPC نایقینی (سیستم سه ناحیه‌ای) ۸۶

فهرست جداول

ردیف	عنوان	صفحه
فصل دوم		
۳۶	جدول ۱-۲ نتایج بهینه سازی تابع تست اسفیر با Colony Size = 20 با ۳۰ بار اجرا در هر شرایط	
۳۷	جدول ۲-۲ نتایج بهینه سازی تابع تست اسفیر با Colony Size = 50 با ۳۰ بار اجرا در هر شرایط	
۳۸	جدول ۳-۲ نتایج بهینه سازی تابع تست اسفیر با Colony Size = 100 با ۳۰ بار اجرا در هر شرایط	
۳۹	جدول ۴-۲ نتایج بهینه سازی تابع تست راستریگین با Colony Size = 20 با ۳۰ بار اجرا در هر شرایط	
۴۰	جدول ۵-۲ نتایج بهینه سازی تابع تست راستریگین با Colony Size = 50 با ۳۰ بار اجرا در هر شرایط	
۴۱	جدول ۶-۲ نتایج بهینه سازی تابع تست راستریگین با Colony Size = 100 با ۳۰ بار اجرا در هر شرایط	
۴۳	جدول ۷-۲ مقادیر میانگین (Mean) و انحراف معیار (Std) حاصل از بهینه سازی توابع تست طی ۳۰ بار اجرای الگوریتم برای هر تابع با D=30 و با تعداد تکرار ۲۰۰۰۰ برای الگوریتم و Colony Size = 50 و $Limit = N_e * D$	
۴۴	جدول ۸-۲ زمان اجرای الگوریتم ABC روی توابع تست، با تعداد ۲۰۰۰۰ تکرار و $Limit = N_e * D$	
۴۶	جدول ۹-۲ نمونه‌ای از پایگاه قواعد بر اساس مقادیر ورودی و خروجی	
۵۲	جدول ۱۰-۲ قوانین فازی برای هر کنترل کننده	
۵۲	جدول ۱۱-۲ محدوده مجاز برای پارامترهای کنترل کننده HFPID	
فصل سوم		
۵۷	جدول ۱-۳ پارامترهای نواحی کنترل	
۷۵	جدول ۲-۳ پارامترهای GENCO ها	
۶۱	جدول ۳-۳ ضرایب کنترل کننده‌های PID به دست آمده با توابع معیار f_{ITSE} ، f_{ITAE} و f_{FDM} توسط الگوریتم ABC	
۶۱	جدول ۴-۳ مقدار پارامترهای ABC	
۶۷	جدول ۵-۳ ضرایب بدست آمده برای کنترل کننده‌های دو ناحیه در شرایط مختلف، توسط الگوریتم ABC	
۶۷	جدول ۶-۳ پارامترهای بهینه کنترل کننده HFPID به دست آمده از ABC برای سیستم دو ناحیه‌ای حرارتی	
۷۳	جدول ۷-۳ مقایسه شاخص‌های کنترلی با وجود نایقینی‌ها برای کنترل کننده‌ها برای سیستم دوناحیه‌ای حرارتی (سناریو ۳)	

- جدول ۳-۸ پارامترهای بهینه کنترل کننده HFPID به دست آمده از ABC برای سیستم دونا حیه آبی-حرارتی ۷۵
- جدول ۳-۹ ضرایب بدست آمده برای کنترل کننده‌های دو ناحیه سیستم آبی-حرارتی در شرایط مختلف، توسط الگوریتم ABC ۷۵
- جدول ۳-۱۰ پارامترهای بهینه کنترل کننده PID به دست آمده از ABC برای سیستم دونا حیه آبی-حرارتی ۷۵
- جدول ۳-۱۱ مقایسه شاخص‌های کنترلی با وجود نایقینی‌ها برای کنترل کننده‌ها برای سیستم دونا حیه‌ای آبی-حرارتی ۷۹
- جدول ۳-۱۲ پارامترهای بهینه کنترل کننده HFPID به دست آمده از ABC برای سیستم سه ناحیه‌ای ۸۱
- جدول ۳-۱۳ پارامترهای بهینه کنترل کننده PID به دست آمده از ABC برای سیستم سه ناحیه‌ای ۸۱
- جدول ۳-۱۴ ضرایب بدست آمده برای کنترل کننده‌های سیستم سه ناحیه‌ای در شرایط مختلف، توسط الگوریتم ABC ۸۲
- جدول ۳-۱۵ مقایسه شاخص‌های کنترلی با وجود نایقینی‌ها برای کنترل کننده‌ها برای سیستم سه ناحیه‌ای ۸۵

فصل اول

مقدمه و معرفی مفاهیم کلی کنترل بار فرکانس و مروری بر کارهای انجام شده

در این فصل ابتدا یک مرور کلی در ارتباط با هدف‌های کنترل بار-فرکانس انجام شده و کلیاتی در مورد آن ارائه شده است. بخش‌های بعدی به مدلسازی عناصر قدرت، توصیف حلقه‌های کنترلی، سیستم چند ناحیه‌ای و مدل بار-فرکانس سیستم در محیط سنتی و تجدید ساختار یافته اختصاص یافته است. در ادامه به محدودیت‌های فیزیکی مانند محدودیت نرخ تولید و باند راکد گاورنر نیز اشاره شده و درباره تاثیر آنها به اختصار صحبت خواهد شد. پس از بیان این مباحث، در انتهای فصل نیز با بررسی کارهای انجام شده در مقالات معتبر، به برخی از کارها در این زمینه پرداخته و به برخی مزایا و معایب آنها اشاره شده است.

۱-۱ مفاهیم کلی کنترل بار-فرکانس

کنترل بار-فرکانس^۱ (LFC) به یک سیستم کنترل اطلاق می‌شوند که سه هدف عمده را تامین کند:

۱. نگه داشتن فرکانس سیستم در مقدار اسمی و یا مقداری نزدیک به مقدار اسمی (مثلاً ۵۰ هرتز).
۲. حفظ مقدار توان مبادله شده بین نواحی در یک مقدار صحیح.

¹ Load- Frequency Control

۳. حفظ تولید هر واحد در اقصادی ترین مقدار ممکن.

فرکانس سیستم قدرت به توازن در تولید و مصرف توان حقیقی بستگی دارد، یک تغییر در بار مصرفی در یک نقطه از سیستم، تمام شبکه را به واسطه تغییر در فرکانس سیستم متاثر می‌سازد. هر گونه عدم تعادل بین بار و تولید منجر به انحراف فرکانس از مقدار نامی می‌شود. کنترل فرکانس و تولید توان به کنترل بار- فرکانس (LFC) معروف است که مهمترین وظیفه کنترل اتوماتیک تولید^۱ (AGC) است. از اهداف مهم LFC کنترل کردن توان جاری شده در خطوط ارتباطی بین نواحی^۲ در مقدار مشخص برنامه ریزی شده است، این عمل باعث کنترل فرکانس نواحی، تحت تغییرات بار نواحی مختلف می‌شود. در صورت کمبود تولید در یک ناحیه، شرکت‌های تولید برق در نواحی دیگر برای کمک به آن خواهند آمد. این تعادل‌سازی بار و تولید به وسیله سیستم LFC انجام می‌پذیرد. در این سیستم به وسیله اندازه گیری انحراف فرکانس از مقدار نامی و انحراف توان عبوری خط ارتباطی از مقدار برنامه‌ریزی شده، سیگنال خطای کنترل ناحیه‌ای^۳ (ACE) از روی این مقادیر محاسبه شده و سپس این سیگنال خطا به کنترل کننده اعمال می‌شود [Kundur. P, 1994].

در صورت تغییر ناگهانی بار در یک ناحیه، فرکانس سیستم دستخوش تغییر (قاعدتا همراه با یک سری نوسانات گذرا) می‌شود. بنابراین مکانیزم فیدبک و کنترل باید بنحوی باشد که با تنظیم سیگنال کنترلی توربین‌ها، باعث تنظیم صحیح تولید ژنراتورها شود. در این صورت در حالت ماندگار، تولید دقیقا مطابق با بار بوده، توان عبوری خط ارتباطی، انحراف فرکانس‌ها و خطای ACE نواحی برابر با صفر است.

این سیستم در گذشته به خوبی پاسخگو بود ولی در ساختار بازار آزاد امروزی شرکت‌های سنتی جایگاهی ندارند، شرکت‌های برق دیگر مالکیت تولید- انتقال- توزیع را ندارند و به جای آن کمپانی‌های تولید (GENCOs)، کمپانی‌های انتقال (TRANSCOs) و کمپانی‌های توزیع (DISCOs) وارد عرصه رقابت بازار شده‌اند. با بوجود آمدن تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، تغییرات اساسی در نظام مدیریت شبکه‌های برق و بهره برداری از آن بوجود آمده است. یکی از اهداف اصلی تجدید ساختار یا جداسازی مدیریتی ایجاد رقابت در سطوح تولید و توزیع است. یکی از مسایل مهم در محیط تجدید ساختار یافته، تامین سرویس‌های جانبی^۴ می‌باشد که در این ساختار جدید، سرویس‌های جانبی اعم از کنترل بار- فرکانس، کنترل توان راکتیو، رزرو و ... بعنوان یک کالای تجاری محسوب می‌شوند. در یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته بسیاری از مفاهیم

¹ Automatic Generation Control (AGC)

² Tie Line

³ Area Control Error

⁴ Ancillary Services

مهندسی بهره‌برداری و برنامه‌ریزی دوباره باید فرمول بندی شوند. با توجه به حضور کمپانی‌های تولید، کمپانی - های انتقال، کمپانی‌های توزیع و اپراتور مستقل سیستم¹ (ISO) بسیاری از سرویس‌های جانبی در سیستم تجدید ساختار یافته نسبت به سیستم سنتی دچار دگرگونی و تغییرات اساسی می‌شوند. در این میان یکی از سرویس‌های جانبی، کنترل بار-فرکانس است. در سناریوی جدید، یک کمپانی توزیع می‌تواند با کمپانی تولید مدنظرش قرارداد ببندد و قراردادهای آنها تحت نظارت ISO خواهد بود. کنترل ناحیه‌ای در این حالت نیز با همان محدودیت‌های قبلی روبرو است، اما در این حالت کمپانی‌های توزیع آزادی قرارداد بستن با هر کمپانی تولید را دارند، چه در ناحیه خودش یا نواحی دیگر [Parida. M, 2005].

۱-۲ مفاهیم حلقه‌های کنترلی فرکانس

بسته به مکانیزم نوع تولید، توان حقیقی تولید شده یک ژنراتور به وسیله توان مکانیکی تولید شده توسط موتور محرک اولیه^۲ (مانند توربین بخار، توربین گازی، توربین آبی، دیزل ژنراتور و ...) کنترل می‌شود. مثلاً در مورد توربین‌های آبی یا بخار، توان مکانیکی به وسیله باز یا بسته کردن شیرهای تنظیم خروجی بخار یا جریان آب به توربین کنترل می‌شود. گاورنر هر واحد تولیدی وظیفه کنترل اولیه سرعت (فرکانس) را دارد. همانطور که در ادامه نشان داده خواهد شد این کنترل‌های اولیه برای تثبیت فرکانس کافی نبوده و حلقه کنترل فرکانس تکمیلی^۳ مورد نیاز است. حلقه تکمیلی به عنوان فیدبک انحرافات فرکانس عمل می‌کند، در سیستم‌های واقعی این کنترل کننده دینامیکی معمولاً یک انتگرال‌گیر ساده، PI یا PID است.

۱-۳ کنترل بار فرکانس در سیستم قدرت تک ناحیه‌ای

سیستم‌های قدرت، طبیعت غیرخطی و متغیر با زمان دارند، ولی به منظور آنالیز کنترل فرکانس در حضور تغییرات بار، مدل ساده خطی سازی شده به کار می‌رود. در مقایسه با دینامیک زاویه روتور و ولتاژ، دینامیک پاسخ فرکانسی نسبتاً کند بوده و در حد ثانیه تا دقیقه است. بنابراین دینامیک‌های سریع (ولتاژ و زاویه) در مدل-سازی در نظر گرفته نمی‌شوند و منجر به سادگی مدل‌سازی و آنالیز می‌شود.

رابطه دینامیکی بین برآیند تولید-بار یک واحد تولیدی ($\Delta P_m - \Delta P_L$) و انحراف فرکانس (Δf) به صورت زیر بیان می‌شوند [Machowski. J, 1997]:

¹ Independent System Operator

² Prime Mover

³ Supplementary Control Loop

$$\Delta P_m(t) - \Delta P_L(t) = 2H \frac{d\Delta f(t)}{dt} + D\Delta f(t) \quad (1-1)$$

که در این رابطه داریم:

Δf : انحراف فرکانس

ΔP_m : تغییر توان مکانیکی

ΔP_L : تغییر بار

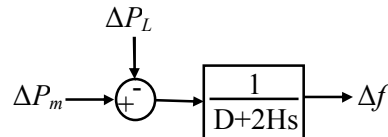
H: ثابت اینرسی^۱

D: ضریب میرایی بار^۲، که به صورت تغییر درصد بار به ازای ۱٪ تغییر در فرکانس تعریف می‌شود.

با اعمال تبدیل لاپلاس به (۱-۱) داریم:

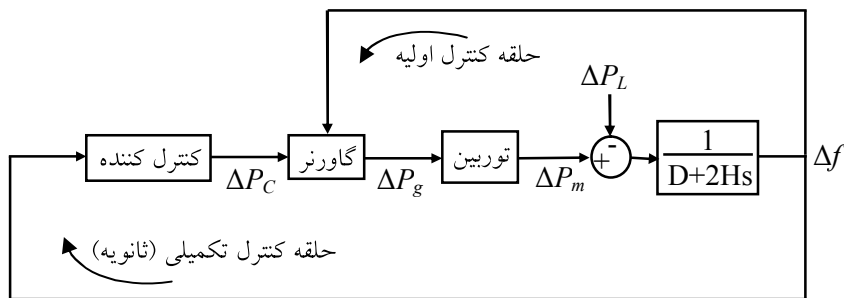
$$\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s) = (2Hs + D)\Delta f(s) \quad (2-1)$$

رابطه (۲-۱) را می‌توان با استفاده از بلوک دیاگرام شکل ۱-۱ پیاده‌سازی کرد.



شکل ۱-۱ بلوک دیاگرام مدل تولید-بار

با بکار بردن این مدل به جای ژنراتور سنکرون مدل حلقه کنترل بار فرکانس به صورت شکل ۲-۱ درمی‌آید.



شکل ۲-۱ بلوک دیاگرام حلقه کنترل بار فرکانس

چندین مدل ساده با مرتبه پایین برای مدل کردن دینامیک‌های توربین و گاورنر برای آنالیز فرکانس سیستم قدرت ارائه شده‌اند. بلوک دیاگرام یک نمونه ساده توصیف کننده گاورنر سرعت و توربین برای یک واحد بخار

در شکل ۲-۱ نشان شده است [MURTY, P. S. R, 1996].

¹ Inertia Constant

² Load Damping Coefficient