

رسالة محمد



دانشگاه اصفهان  
دانشکده فنی و مهندسی  
گروه برق

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی برق گرایش قدرت

**طراحی پارامترهای کنترلر PID توسط شبکه ی وقتی عصبی – فازی برای کنترل  
فرکانس بار**

استاد راهنما:

دکتر امین خدابخشیان

استاد مشاور:

دکتر بهزاد میرزائیان

پژوهشگر:

محمد رضا علی محمدی

خرداد ماه ۱۳۸۹

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و  
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
متعلق به دانشگاه اصفهان است.

## تشکر و قدردانی

حال که به لطف و کرم خدا، این محمل به سر منزل رسیده است با دلی سرشار از خضوع و خشوع و مهر و عشق نسبت به ذات اقدس خداوندی، او را شکر و سپاس می‌گوییم که شایستگی تحصیل و پوییدن راه علم و تحقیق را به من عطا فرمود. همچنین بر خود فرض می‌دانم مراتب تقدیر و قدردانی صمیمانه خود را از آقایان دکتر امین خدابخشیان و دکتر بهزاد میرزائیان، اساتید راهنما و مشاور تقدیم نمایم که بدون پشتیبانی و مساعدت‌های ایشان طی این طریق بسیار بعید و دشوار می‌نمود

تقديم به پدر و مادر عزیزم

## چکیده:

امروزه با گسترش روزافزون سیستم‌های قدرت و مطرح شدن فرکانس بعنوان یکی از معیارهای سنجش کیفیت توان تحویلی، نیاز به کنترل آن به یک امر اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. هدف اصلی از کنترل فرکانس سیستم، حفظ فرکانس در مقدار نامی و توان تبدلی در مقدار قراردادی می‌باشد. در این زمینه روش‌های کنترلی مختلفی ارائه گشته است، که بین آنها کنترلرهای PI و PID بدلیل سادگی و قابل پیاده‌سازی بودن آنها از متداول‌ترین کنترلرها می‌باشد که معمولاً برای یک نقطه کار و بر اساس مدل خطی سیستم طراحی می‌شود. نقطه‌ی کار سیستم بدلیل تغییر مقدار بار نواحی بطور دائم در حال تغییر بوده و بنابراین این نوع کنترل‌کننده‌ها ممکن است برای تمام نقاط کار سیستم مناسب نباشند.

در سالهای اخیر روش‌های کنترلی مختلفی مانند روش‌های وفقی و هوشمند جهت حل این مشکل ارائه شده است. از آنجا که تخمین متغیرهای یک سیستم قدرت با استفاده از روش‌های کنترلی وفقی مشکل می‌باشد و در عمل ممکن است امکان‌پذیر نگردد، استفاده از روش‌های هوشمند جهت حل مسئله، مورد توجه قرار گرفت.

روش‌های هوشمند موجود اغلب برگرفته از طبیعت و محیط پیرامون انسان می‌باشد. الگوریتم‌های تکاملی موجود مانند PSO<sup>1</sup> و GA<sup>2</sup> از روش‌های بهینه‌سازی هستند که می‌توانند ضرایب کنترلرهای PI و PID را در راستای بهبود مشخصه‌های دینامیکی سیستم، تولید نمایند. اما این نوع الگوریتم‌ها نیز بدلیل صرف زمان زیاد جهت تولید ضرایب کنترلرها، جهت کنترل بهنگام<sup>3</sup> سیستم مناسب نمی‌باشند.

با مطرح شدن اصول منطق فازی و در ادامه مطرح شدن کنترلرهای فازی؛ بسیاری از مسائل موجود در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و کنترل این نوع سیستم‌ها رفع شد. با این حال مسائلی مانند تعیین ضرایب بهینه‌ی وزن دهی و پارامترهای بهینه‌ی توابع عضویت این نوع کنترلرها نیز مطرح است. جهت رفع این مشکل می‌توان از ترکیب الگوریتم‌های هوشمند استفاده کرد که یکی از الگوریتم‌های قدرتمند را می‌توان شبکه‌های وفقی عصبی فازی (ANFIS)<sup>4</sup> دانست.

شبکه‌های وفقی عصبی فازی ترکیب دو الگوریتم فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی است. در این پایان‌نامه از الگوریتم PSO جهت تولید ضرایب بهینه‌ی یک کنترلر PID در نقاط مختلف کار سیستم استفاده شده است. ضرایب بدست آمده بصورت ناهنگام<sup>5</sup> را بعنوان یک مجموعه اطلاعات آموزشی جهت آموزش ANFIS استفاده می‌شود. ANFIS بوسیله‌ی الگوریتم آموزشی ترکیبی و بواسطه‌ی تغییر پارامترهای توابع عضویت سعی در حداقل کردن خطای بین خروجی واقعی و خروجی بهینه‌ی بدست آمده از الگوریتم PSO دارد. سپس ANFIS یک نقشه کلی بین نقاط کار و ضرایب بهینه‌ی سیستم ایجاد می‌کند و از این طریق ضرایب کنترلر PID بصورت بهنگام به ازای تغییر نقاط کار سیستم تغییر می‌کند. شبیه‌سازی بر روی یک سیستم چند ماشینه در حضور کنترلر PID طراحی شده توسط ANFIS انجام گرفته است. با مقایسه نتایج بدست آمده از کنترلر PID طراحی شده توسط ANFIS، PSO و FUZZY، مشاهده می‌گردد کنترلر PID طراحی شده توسط ANFIS نسبت به دیگر روش‌های ذکر شده در تعقیب تغییر نقطه کار سیستم عملکرد بهتری دارد.

**واژگان کلیدی:** کنترل فرکانس بار، کنترلرهای هوشمند، کنترلر PID، کنترلر Fuzzy، ANFIS

1 Particle Swarm Optimization

2 Genetic Algorithm

3 Online

4 Adaptive Neuro Fuzzy System Inference

5 offline

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول
۱.....	کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت .....
۲.....	۱-۱- مقدمه .....
۸.....	۱-۲- کنترل کلاسیک .....
۹.....	۱-۳- کنترل وفقی .....
۱۰.....	۱-۴- کنترل مقاوم و ساختار متغییر .....
۱۲.....	۱-۵- کنترل هوشمند .....
۱۲.....	۱-۵-۱- مقدمه .....
۱۲.....	۱-۵-۲- شبکه‌های عصبی مصنوعی .....
۱۳.....	۱-۵-۳- کنترلرهای فازی .....
۱۳.....	۱-۵-۴- کنترلرهای طراحی شده توسط الگوریتم‌های تکاملی و ترکیبی از دو روش هوشمند .....
۱۴.....	۱-۶- کنترل فرکانس در سیستم های دارای خطوط DC .....
۱۵.....	۱-۷- کنترل فرکانس در حضور ادوات ذخیره ساز انرژی ، ادوات FACTS و نیروگاه‌های بادی .....
۱۶.....	۱-۸- کنترل فرکانس در سیستم های تجدید ساختار .....
	فصل دوم
۲۰.....	مدلسازی کنترل فرکانس بار .....
۲۰.....	۲-۱- مقدمه .....
۲۱.....	۲-۲- مدل خطی شده سیستم تک ناحیه .....
۲۲.....	۲-۳- مدل خطی سیستم چند ناحیه‌ای در کنترل فرکانس .....
	فصل سوم
۲۵.....	الگوریتم‌های هوشمند .....
۲۵.....	۳-۱- مقدمه .....
۲۶.....	۳-۲- الگوریتم تکاملی PSO .....
۲۶.....	۳-۲-۱- مطالعه رفتار پرندگان و ایده اولیه PSO .....

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲۶	۲-۲-۳ روابط حاکم بر الگوریتم PSO
۲۹	۳-۲-۳ مزیت‌های PSO در قیاس با سایر الگوریتم‌های جستجو
۲۹	۳-۳ کنترل‌های فازی
۲۹	۱-۳-۳ مقدمه
۳۱	۲-۳-۳ انواع کنترل‌های فازی
۳۲	۴-۳ سیستم‌های وفقی-عصبی-فازی
۳۲	۱-۴-۳ مقدمه
۳۳	۲-۴-۳ سیستم فازی سوگینو
۳۴	۳-۴-۳ شبکه‌های عصبی-مصنوعی
۳۵	۴-۴-۳ شبکه‌های وفقی: ساختار و الگوریتم‌های آموزشی
۳۹	۵-۴-۳ دلایل مدل کردن شبکه‌های عصبی-فازی
۴۰	۶-۴-۳ ساختار ANFIS
۴۲	۷-۴-۳ الگوریتم آموزشی ترکیبی در ANFIS
۴۴	۵-۳ نتیجه‌گیری

### فصل چهارم

۴۵	طراحی کنترلر PID برای کنترل فرکانس توسط الگوریتم‌های هوشمند
۴۵	۱-۴ مقدمه
۴۶	۲-۴ کنترل‌های PI و PID
۴۷	۳-۴ طراحی کنترلر PID و PI توسط الگوریتم تکاملی PSO
۵۰	۴-۴ طراحی کنترلر PID توسط منطق فازی
۵۴	۵-۴ بهینه‌سازی ضرایب وزن‌دهی یک کنترلر فازی
۵۸	۶-۴ نتیجه‌گیری

### فصل پنجم

۵۹	طراحی کنترلر PID توسط شبکه وفقی-عصبی-فازی (ANFIS)
۵۹	۱-۵ مقدمه
۶۰	۲-۵ طراحی کنترل کننده توسط ANFIS



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۶۰	۱-۲-۵- انتخاب ورودی‌های ANFIS
۶۱	۲-۲-۵- تهیه‌ی مجموعه اطلاعات آموزشی
۶۲	۳-۲-۵- انتخاب تعداد و نوع توابع فازی و الگوریتم آموزشی
۶۳	۴-۲-۵- ارزیابی شبکه‌ی آموزش‌یافته
۶۵	۳-۵- مقایسه کنترلرهای PID طراحی شده توسط ANFIS و PSO
۷۰	۴-۵- مقایسه دو کنترلر طراحی شده توسط ANFIS و FUZZY
۷۴	۵-۵- مقایسه کنترلر PIDANFIS و PIDMPRS
۷۷	۶-۵- مقایسه کنترلر PIDANFIS و PIANFIS
۸۴	۷-۵- نتیجه‌گیری
	فصل ششم
۸۵	نتیجه‌گیری و پیشنهاد ادامه کار
۸۵	۱-۶- نتیجه‌گیری
۸۶	۲-۶- پیشنهاد ادامه کار
۸۷	منابع و مأخذ

## فهرست شکل

صفحه	عنوان
۳.....	شکل (۱-۱) طریقه بدست آوردن مشخصه افقی معادل سیستم.....
۴.....	شکل (۲-۱) مشخصه سرعت-دروپ یک توربین با حد بالا.....
۴.....	شکل (۳-۱) تاثیر حد بالای توربین و تخصیص ذخیره چرخان بر مشخصه تولید:(الف) تخصیص تناسبی سیستم (ب) تخصیص ذخیره چرخان فقط به واحد دوم.....
۵.....	شکل ( ۴-۱ ) نقاط تعادل به ازای تغییر در تقاضای توان.....
۶.....	شکل(۵-۱) مشخصه های دروپ-سرعت توربین به ازاء تغییر <b>Pref</b> .....
۶.....	شکل ( ۶-۱ ) کنترل تکمیلی اضافه شده به سیستم تنظیم سرعت توربین.....
۷.....	شکل ( ۷-۱ ) تعادل توان منطقه کنترل.....
۱۷.....	شکل(۸-۱) یک سیستم دو ناحیه ایی با دو شرکت توزیع وتولید کننده در هر ناحیه.....
۱۹.....	شکل (۹-۱) بلوک دیاگرام مسئله کنترل فرکانس یک سیستم دو ناحیه ایی در محیط رقابتی.....
۲۰.....	شکل (۱-۲) مدل مجموعه مولد و توربین.....
۲۱.....	شکل (۲-۲) مدل سیستم تک ناحیه ای.....
۲۲.....	شکل (۳-۲) سیستم دوناحیه ایی.....
۲۲.....	شکل (۴-۲) مدل الکتریکی یک سیستم دوناحیه ای.....
۲۳.....	شکل (۵-۲) مدل خطی سیستم دو ناحیه ایی.....
۲۴.....	شکل (۶-۲) مدل خطی سیستم دوناحیه با کنترل اضافی.....
۲۷.....	شکل(۱-۳) به روز شدن سرعت و موقعیت یک ذره.....
۲۸.....	شکل (۲-۳) فلوجارت الگوریتم PSO.....
۳۰.....	شکل (۳-۳) شمای کلی یک کنترلر فازی.....
۳۱.....	شکل(۴-۳)کنترل چند سطحی نوع اول.....
۳۲.....	شکل (۵-۳)کنترل چند سطحی نوع دوم.....
۳۳.....	شکل (۶-۳) فرآیند سیستم های سوگینو.....
۳۴.....	شکل (۷-۳) یک شبکه چند لایه MLP.....

## فهرست شکل

صفحه	عنوان
۳۵.....	شکل (۸-۳) ساختمان یک نرون.....
۳۶.....	شکل (۹-۳) یک شبکه افقی.....
۴۰.....	شکل (۱۰-۳) (a) سیستم فازی سوگینو (b) ANFIS معادل.....
۴۲.....	شکل (۱۱-۳) (a) یک سیستم ANFIS با ۲ ورودی و ۹ قانون (b) زیر فضای ایجاد شده توسط سیستم فازی.....
۴۸.....	شکل (۱-۴) (a) تغییرات فرکانس زاویه‌ای ناحیه اول، (b) تغییرات فرکانس زاویه‌ای ناحیه دوم.....
۴۸.....	(c) تغییرات توان تبادلی.....
۴۹.....	شکل (۲-۴) معیارهای الگوریتم PSO (a) معیار حداقل الگوریتم (b) معیار متوسط الگوریتم.....
۴۹.....	شکل (۳-۴) تغییرات فرکانس زاویه‌ای ناحیه دوم در دو نقطه نامی و غیر نامی در حضور PSOPID.....
۵۰.....	شکل (۴-۴) خروجی سیستم به ازاء ورودی پله.....
۵۲.....	شکل (۵-۴) (a) تابع عضویت خطا (b) تابع عضویت تغییرات خطا.....
۵۲.....	شکل (۶-۴) توابع عضویت خروجی (Kd، Kp، Ki).....
۵۲.....	شکل (۷-۴) مدل ناحیه اول یک سیستم دو ناحیه‌ای در حضور کنترلر فازی.....
۵۳.....	شکل (۸-۴) مدل کلی کنترلر فازی بکار رفته.....
۵۳.....	شکل (۹-۴) (a) تغییرات فرکانس زاویه‌ای ناحیه اول (b) تغییرات فرکانس زاویه‌ای ناحیه دوم.....
۵۵.....	شکل (۱۰-۴) مدل ناحیه اول یک سیستم دو ناحیه‌ای در حضور کنترلر فازی بهینه شده.....
۵۵.....	شکل (۱۱-۴) شمای کنترلر فازی در حضور ضرایب وزن دهی.....
۵۶.....	(۱۲-۴) معیارهای الگوریتم PSO.....
۵۷.....	شکل (۱۳-۴) (a) تغییرات فرکانس زاویه‌ای ناحیه اول (b) تغییرات فرکانس زاویه‌ای ناحیه دوم (c) تغییرات توان تبادلی.....
۶۳.....	شکل (۱-۵) مدل ناحیه اول یک سیستم دو ناحیه‌ای در حضور کنترلر ANFIS.....
۶۴.....	شکل (۲-۵) منحنی خطا به تکرار برای ضریب تناسبی کنترلر PID اول.....
۶۵.....	شکل (۳-۵) مقایسه‌ی خروجی ANFIS ضریب تناسبی کنترلر PID اول به ازای ورودی تست نسبت به خروجی واقعی.....
۶۷.....	شکل (۴-۵) تغییرات فرکانس زاویه‌ای در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIDPSO و PIDANFIS.....

## فهرست شکل

عنوان	صفحه
شکل (۵-۵) تغییرات فرکانس زاویه‌ای در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIDPSO و PIDANFIS	۶۸.....
شکل (۶-۵) تغییرات فرکانس زاویه‌ای در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIDPSO و PIDANFIS	۶۹.....
شکل (۷-۵) توابع عضویت ورودی قبل و بعد بهینه‌سازی	۷۱.....
شکل (۸-۵) تغییرات فرکانس زاویه‌ای در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIDFUZZY و PIDANFIS	۷۲.....
شکل (۸-۵) تغییرات فرکانس زاویه‌ای در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIDFUZZY و PIDANFIS	۷۳.....
شکل (۹-۵) تغییرات فرکانس زاویه‌ای در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIDFUZZY و PIDANFIS	۷۴.....
خارج نقطه نامی	۷۴.....
شکل (۱۰-۵) مدل سیستم دو ناحیه‌ای در حضور کنترلر PIDMPRS	۷۵.....
شکل (۱۱-۵) تغییرات فرکانس زاویه‌ای در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIDMPRS و PIDANFIS	۷۶.....
خارج نقطه نامی	۷۶.....
شکل (۱۲-۵) ناحیه اول یک سیستم تک ناحیه‌ای با حضور PI	۷۷.....
شکل (۱۳-۵) مقایسه خروجی سیستم در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIANFIS و PIDANFIS	۷۷.....
شکل (۱۴-۵) تغییرات فرکانس زاویه‌ای در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIANFIS و PIDANFIS	۷۸.....
شکل (۱۵-۵) اغتشاشات وارده به سیستم	۷۹.....
شکل (۱۶-۵) تغییرات فرکانس زاویه‌ای در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIANFIS و PIDANFIS به	۸۰.....
ازای اغتشاشات	۸۰.....
شکل (۱۷-۵) نمای نزدیک از خروجی سیستم در حضور دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PIANFIS و	۸۲.....
PIDANFIS به ازای اغتشاشات	۸۲.....
شکل (۱۸-۵) تغییرات ضرایب کنترلرها به ازای اغتشاشات	۸۳.....

## فهرست جدول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۳) فعالیت انجام شده در هر مسیر .....	۴۳
جدول (۱-۴) تغییر معیارهای پایداری به ازای تغییر پارامترهای PID .....	۴۶
جدول (۲-۴) متغیرهای الگوریتم PSO .....	۴۷
جدول (۳-۴) مقایسه پارامترهای دو کنترلر PI و PID طراحی شده توسط PSO .....	۴۷
جدول (۴-۴) جدول قوانین <b>Kd, Kp, Ki</b> .....	۵۱
جدول (۵-۴) مقایسه ضرایب وزن‌دهی کنترلر فازی معمولی و فازی بهینه شده .....	۵۶
جدول (۱-۵) محدوده‌ی تغییرات پارامترها .....	۶۲
جدول (۲-۵) مقایسه ضرایب کنترلر بدست آمده از دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PSO و ANFIS .....	۶۶
جدول (۳-۵) مقایسه ضرایب کنترلر بدست آمده از دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی PSO و ANFIS .....	۶۸
جدول (۴-۵) مقایسه ضرایب کنترلر بدست آمده از دو کنترلر طراحی شده بوسیله‌ی ANFIS و MPRS .....	۷۵

## فصل اول

### کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت

#### ۱-۱- مقدمه

کنترل فرکانس بار کنترلی می‌باشد که توسط آن توان تولیدی و توان مصرفی توسط آن در حالت تعادل نگه‌داشته می‌شود. هدف اصلی کنترل فرکانس باز گرداندن فرکانس سیستم و توان خط ارتباطی به مقدار نامی و مقدار از پیش تعیین شده است. در این بخش به اختصار به شرح روابط موجود در این زمینه پرداخته می‌شود. بطور کلی فرکانس و توان مصرفی بار رابطه عکس با یکدیگر دارند، بطور مثال با افزایش بار، فرکانس افت خواهد

کرد. [۱]

رابطه تغییرات فرکانس با تغییرات توان میکائیکی برای هر واحد به صورت زیر می‌باشد که  $f_n$  فرکانس نامی و  $P_{ni}$  توان نامی واحد  $i$  ام می‌باشد.

$$\frac{\Delta f}{f_n} = -\rho \frac{\Delta P_{mi}}{P_{ni}} \quad (1-1)$$

$$\frac{\Delta P_{mi}}{P_{ni}} = -K_i \frac{\Delta f}{f_n} \quad (2-1)$$

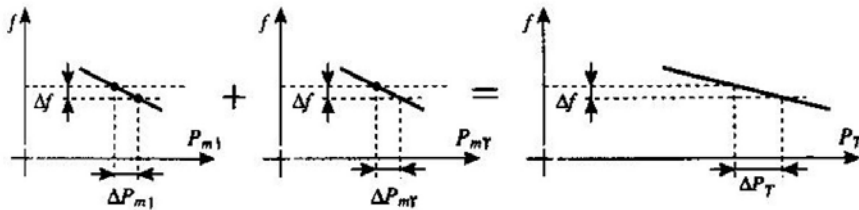
که

$$\rho_i = \frac{1}{k_i}$$

که علامت منفی نشان دهنده ی معکوس بودن بین تغییرات فرکانس و تغییرات توان میکائیکی ورودی مولد می باشد. اگر یک تغییر در بار صورت گیرد، این تغییر بین تمامی واحد ها با توجه به میزان ذخیره ی چرخان آن ها توزیع می گردد.

$$\Delta P_T = \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{mi} = -\frac{\Delta f}{f_n} \sum_{i=1}^{N_G} K_i \Delta P_{ni} = -\Delta f \sum_{i=1}^{N_G} \frac{K_i P_{ni}}{f_n} \quad (3-1)$$

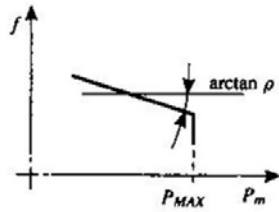
که در آن  $N_G$  تعداد واحدهای تولید در سیستم است. زیر نویس T نشان می دهد که  $\Delta P_T$  تغییر توان تولید شده است که توسط توربین ها تحویل داده شده است. این رابطه بیانگر جبران نا متعادلی بار به بهای انحراف از فرکانس می باشد.



شکل (۱-۱) طریقه بدست آوردن مشخصه افقی معادل سیستم

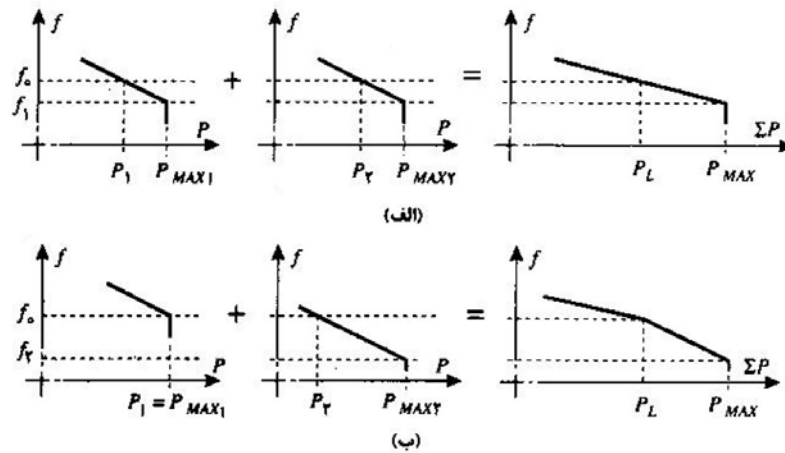
لازم به یادآوری است که در یک سیستم قدرت با واحدهای تولید زیاد، مشخصه تولید تقریباً افقی است به نحوی که حتی یک تغییر توان نسبتاً زیاد فقط منجر به انحراف بسیار کمی در فرکانس می گردد. این موضوع یکی از مزایایی است که از ترکیب واحدهای تولید و تبدیل آنها به یک سیستم بزرگ به دست می آید. برای بدست آوردن مشخصه تولید معادل، مشخصه سرعت-دروپ هر یک واحدهای توربین مولد در محدوده تغییرات توان و فرکانس خطی است. طریقه بدست آوردن این مشخصه تولیدی معادل را می توان در شکل (۱-۱) ملاحظه کرد. دیده می شود که تغییر توان بار به میزان  $\Delta P_T$  بین دو واحد به میزان  $\Delta P_{m1}$  و  $\Delta P_{m2}$  تقسیم می شود و متناسب با آنها مشخصه تولید معادل بدست می آید.

اما در عمل توان خروجی هر توربین با پارامترهای فنی مانند حد توان پایین بدلیل وجود مشعل ها و حد توان بالا بدلیل ملاحظات حرارتی و میکائیکی آن محدود می شود. در اینجا فقط حد بالایی توربین را در نظر گرفته شده است. مشخصه تولیدی یک واحد را با در نظر گرفتن حد بالایی را در شکل (۲-۱) می توان ملاحظه کرد.



شکل (۲-۱) مشخصه سرعت-دروپ یک توربین با حد بالا

شکل (۲-۱) نشان می دهد که اگر واحدی در ماکسیمم توان خروجی خود کار کند، قادر به جبران تغییر بار نمی باشد. در واقع  $P_i = \infty$  یا  $k_i = 0$  می باشد و توربین نقشی در مشخصه تولید معادل سیستم ایفا نخواهد کرد. از شکل (۳-۱) می توان به نقش مهم ذخیره چرخان [ ذخیره چرخان = اختلاف بین توان نامی تمامی واحدهای در حال کار و بار واقعی ] پی برد. نحوه تقسیم ذخیره ی چرخان بین واحدها، روی مشخصه تولیدی معادل سیستم تأثیر زیادی دارد که می توان این موضوع را در شکل (۳-۱) مشاهده کرد.



شکل (۳-۱) تأثیر حد بالای توربین و تخصیص ذخیره چرخان بر مشخصه تولید: (الف) تخصیص تناسبی سیستم

(ب) تخصیص ذخیره چرخان فقط به واحد دوم

در شکل (۳-۱-الف) ذخیره چرخان متناسب بین واحدها تقسیم شده است در حالی که در شکل (۳-۱-ب) یکی از واحدها در نقطه ماکسیمم خود کار می کند، که موجب غیر خطی شدن مشخصه ی تولید شده است. لازم به یادآوری می باشد که در عمل نیز مشخصه تولید غیر خطی می باشد ولی بدلیل تغییرات کم بار می تون آنرا خطی در نظر گرفت.

روابط معادل برای تمام شبکه بصورت زیر می باشد.



$$\frac{\Delta P_T}{P_L} = \frac{-K_T \Delta F}{F_n} \rightarrow \frac{\Delta f}{f_n} = -\rho_T \frac{\Delta P_T}{P_L} \quad (4-1)$$

که

$$K_T = \frac{\sum^{NG} K_i P_{ni}}{P_L} \quad (5-1)$$

می باشد و  $\rho_T$  همان مشخصه تولید می باشد، که به ذخیره چرخان و نحوه ی تخصیص آن بین واحد ها بستگی دارد. همانطور که گفته شده معادله ی  $\frac{\Delta f}{f_n} = -\rho_T \frac{\Delta P_T}{P_L}$  یک تقریبی خطی در زمان تعادل بین بار و تولید می باشد، اما از طرفی بار نیز وابسته به فرکانس است و آنرا می توان با رابطه ی تقریبی خطی زیر نشان داد.

$$\frac{\Delta P_L}{P_L} = K_L \frac{\Delta f}{f_n} \quad (6-1)$$

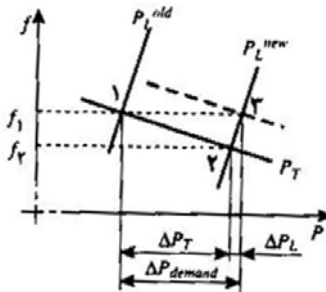
که  $K_L$  را ضریب حساسیت بار فرکانس گویند و باید در نظر داشت که وابستگی مشخصه تولید به فرکانس به مراتب از وابستگی بار به فرکانس بیشتر است، یعنی  $3 \leq K_L \leq 5$  در حالی که  $K_T = 20$  و  $\rho_T = 0.5$  می باشد. دقت شود که  $K_L$  و  $K_T$  دارای علامت مخالف بوده که نمایانگر عکس فرکانس و توان بار می باشد. در صفحه ی  $(f, p)$  نقطه قطع دو معادله

$$\frac{\Delta P_L}{P_L} = K_L \frac{\Delta f}{f_n} \quad (7-1)$$

و

$$\frac{\Delta f}{f_n} = -\rho_T \frac{\Delta P_T}{P_L} \quad (8-1)$$

نقطه تعادل می باشد. یک تغییر در تقاضای بار به میزان  $\Delta P_{demand}$ ، منجر به تغییر مکان مشخصه بار در مسیر نشان داده شده در شکل (۴-۱) می گردد.



شکل (۴-۱) نقاط تعادل به ازای تغییر در تقاضای توان

با افزایش بار سیستم ، تولید توربین افزایش می یابد [ نقطه تعادل از یک به دو می رود ] و در مرحله دوم با کاهش تقاضای بار سیستم به ازای  $\Delta P_L$  نقطه تعادل از ۲ به ۳ می رود . پس این علامت را می توان با رابطه ی زیر نشان داد .

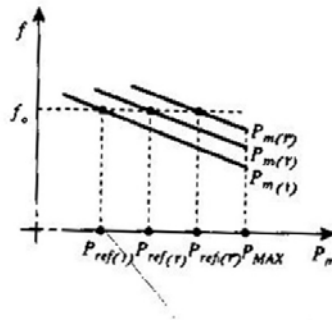
$$\Delta P_{\text{demand}} = \Delta P_T - \Delta P_L = -(K_T + K_L)P_L \frac{\Delta F}{F_n} \quad (9-1)$$

که

$$K_f = K_T + K_L$$

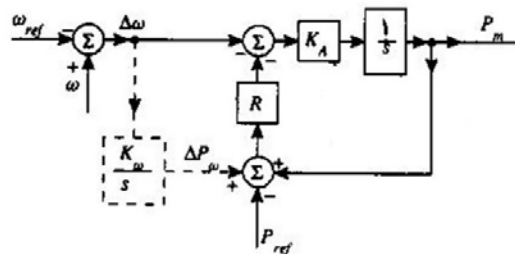
که  $K_f$  را ضریب سفتی سیستم گویند و سمت راست عبارت پاسخ فرکانس سیستم می باشد . برای بازگشت فرکانس به حالت مرجع باید مشخصه تولید ، به نقطه ۳ شیفت پیدا کند . برای این منظور باید  $P_{\text{ref}}$  تغییر کند .

شکل (۵-۱)



شکل (۵-۱) مشخصه های دروپ-سرعت توربین به ازاء تغییر  $P_{\text{ref}}$

این شکل نشان دهنده ی آن است که ، یک سیستم در حضور گاورنر توانایی پایدار سازی فرکانس را دارد ، ولی بدون حضور سیگنال کنترلی قادر به بازگرداندن فرکانس به مقدار مرجع نمی باشد. این سیگنال کنترلی ( $\Delta P_w$ ) در واقع مقدار  $P_{\text{ref}}$  را برای رسیدن به نقطه ۳ تغییر می دهد، این حلقه کنترلی در شکل (۶-۱) نشان داده شده است .

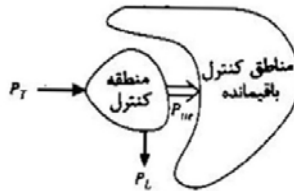


شکل ( ۶-۱ ) کنترل تکمیلی اضافه شده به سیستم تنظیم سرعت توربین

در یک سیستم تک ناحیه ایی که دارای چندین واحد تولیدی می باشد، لازم به تجهیز شدن تمام واحد ها به این سیکل کنترلی نمی باشد و تنها عمل تنظیم فرکانس را معمولاً یک واحد با ظرفیت متوسط انجام می دهد، که به آن

کنترل غیر متمرکز می گویند. [۱]. ولی در یک دید وسیع تر به موضوع کنترل فرکانس، یعنی سیستم های که دارای نواحی مختلف است، نمی توان از کنترل غیر متمرکز استفاده کرد، زیرا این حلقه های کنترلی اطلاعاتی در مورد منطقه ایی که عدم توازن در آن اتفاق می افتد، ندارد. بنابراین، هر تغییری در تقاضای توان یک منطقه منجر به عمل تنظیم کننده ها در همه مناطق می شود. از طرفی علاوه بر کنترل فرکانس در هر ناحیه باید توان عبوری بین نواحی مختلف نیز در مقدار قراردادی قرار گیرد. در این سطح کنترل که به آن کنترل خود کار تولید می گویند تغییر بار در دو ناحیه ای توسط تمام نواحی حس شده و کنترل فرکانس با یک قید دیگر بنام توان تبادلی باید انجام گردد، که به آن کنترل متمرکز نیز می گویند. [۱]

یک نمونه از این شبکه در شکل (۷-۱) نشان داده شده است.



شکل ( ۷-۱) تعادل توان منطقه کنترل

همانطور که در شکل بالا نشان داده می شود، باید رابطه ی زیر برقرار باشد.

$$P_T - (P_L + P_{tie}) = 0 \quad (10-1)$$

روند کار به این شکل می باشد:

فرکانس در هر ناحیه اندازه گیری شده و با فرکانس مرجع مقایسه می گردد. در نهایت این اختلاف در یک ضریب  $\beta_r$  که به ضریب بایاس فرکانس<sup>۱</sup> معروف می باشد، ضرب شده تا میزان تغییر توان تولیدی در آن ناحیه را به ازای آن انحراف فرکانس تعیین نمایند. این مرحله را سطح اول از کنترل چند سطحی فرکانس می نامند.

$$\Delta P_F = \beta_r \Delta F \quad (11-1)$$

اگر معادله ی (۱۲-۱) را در معادله ی فوق قرار دهیم،  $\beta_r$  مطابق با معادله ی (۱۳-۱) بدست خواهد آمد.

$$\Delta P_F = -K_F P_L \frac{\Delta F}{f_n} \quad (12-1)$$

$$\beta_r = k_F \frac{P_L}{f_n} \quad (13-1)$$

<sup>1</sup> Frequency bias factor

همانطور که دیده می شود این ضریب وابسته به  $P_L$  و  $K_F$  می باشد، ولی بدست آوردن  $K_F$  عملاً کار مشکلی می باشد. در سطح دوم کنترل،<sup>۱</sup> توان بین نواحی اندازه گیری شده و با مقدار قراردادی مقایسه شده و در نهایت یک سیگنال بنام خطای کنترل منطقه<sup>۱</sup> ایجاد می گردد.

$$ACE = -\Delta P_{tie} - \beta_r \Delta f \quad (۱۴-۱)$$

تمام هدف در کنترل فرکانس به این جا ختم خواهد شد که در صورت بروز هر اغتشاش، مقدار ACE باید برابر صفر گردد. در این صورت می توان مطمئن شد، فرکانس و توان تبدلی خطوط همیشه در مقدار از قبل تنظیم شده قرار خواهد گرفت.

شکل (۲-۱۵) نشانگر یک سیستم کنترل خودکار برای یک سیستم دو ناحیه ای می باشد. همانطور که در این شکل ملاحظه می گردد، از یک کنترلر PI برای رفع خطا استفاده شده است.

با پیشرفت صنعت و افزایش پیچیدگی های سیستم قدرت، مسئله ی کنترل فرکانس از اهمیت بالای برخوردار شده است، بگونه ای که در سال های گذشته توجه بسیاری روی این مسئله در سیستم های قدرت و تکنیک های مختلف طراحی آن، شده است. با توجه به اهمیت موضوع، انواع کنترل کننده های طراحی شده در سیستم های قدرت در این فصل مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.

## ۱-۲- کنترل کلاسیک

از متداول ترین کنترل کننده های کلاسیک، کنترلر PI می باشد. این نوع کنترل کننده ها دارای دو گین تناسبی و انتگرالی هستند که برای تعیین گین مناسب از دیاگرام بود، نایکویست و مکان ریشه ها استفاده می شود [۲]. در این نوع کنترل معمولاً از انتگرال خطا بعنوان سیگنال کنترلی استفاده می شود. این نوع کنترلرها بسیار ساده بوده و قابل اجرا در عمل می باشد ولی متقابلاً دارای پاسخ دینامیکی مناسب نبوده و با تغییر نقطه کار از حالت بهینه خارج می گردد [۲]. در [۳] نویسنده از کنترل بهینه جهت دستیابی به اهداف خود استفاده کرده و تابع هدف را ترکیبی از پایداری و هزینه ها انتخاب کرده است و به این ترتیب مشخصه های پایداری سیستم را بهبود داده است.

مشکل بزرگی که در پیاده سازی کنترل بهینه بر روی سیستم های قدرت وجود دارد، نبودن روش مشخصی برای پیدا کردن ماتریس های وزندهی می باشد. در مقاله [۴]، نویسنده از روش مکان یابی قطب ها بران انتقال قطب های ناپایدار و ضعیف از لحاظ دینامیکی به محدوده ی ایده آل استفاده کرده است و به این ترتیب توانسته مشخصه های دینامیکی سیستم را بهبود دهد. در مقاله ی [۵] نویسنده بجای استفاده از عامل انتگرالگیر در یک کنترلر PI از عامل  $\frac{1}{s+\lambda}$  استفاده کرده است و آنرا کنترلر PI توسعه یافته<sup>۲</sup> می نامد. در ادامه ی همین مقاله نشان داده است که این کنترلر

<sup>۱</sup> Area Control Error(ACE)

<sup>۲</sup> Extended PI