

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق - گرایش قدرت

بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت توسط جبران‌کننده‌ی مدرن  
UPFC با کنترل‌کننده عصبی - فازی

استاد راهنما:

دکتر سعید اباذری

استاد مشاور:

دکتر غلامرضا عرب مارکده

پژوهشگر:

فروغ تاکی

اسفند ۱۳۸۸



دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه‌ی خانم فروغ تاکی جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق گرایش قدرت با عنوان: "بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت توسط جبران‌کننده‌ی مدرن UPFC با کنترل‌کننده عصبی- فازی" در تاریخ ۱۳۸۸/۱۱/۲۲ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و با نمره‌ی ۱۸/۸۵ مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر سعید اباذری با مرتبه علمی استادیار امضا

۲. استاد مشاور پایان‌نامه دکتر غلامرضا عرب مارکده با مرتبه علمی استادیار امضا

۳. استاد داور داخلی گروه دکتر عباس کارگر با مرتبه علمی استادیار امضا

۴. استاد داور خارجی گروه دکتر بهزاد میرزائیان با مرتبه علمی استادیار امضا

دکتر قاسمی

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی و مهندسی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

به نام او

پاس او

که شوق آموختن را درونم نهاده و راه هدایتم را روشنی بخشیده است.

تقدیرم به پدر و مادرم

که هر دو وجودم و انداز جایتم بی دریغشان و کرمای روح بخش کلامشان است؛

و

همسرم

به پاس حافظه سرشار و اندیشه زرخش که خاطر من را زلال و روحم را صیقل بخشیده است.

## چکیده:

شبکه‌های انتقال در سیستم‌های مدرن قدرت، به دلیل افزایش تقاضا از یک سو و محدودیت‌های احداث خطوط جدید از سوی دیگر، تحت فشار مضاعف می‌باشند. یکی از نتایج این مسئله، خطر از دست رفتن پایداری به دنبال بروز یک اغتشاش است. با پیدایش سیستم‌های انتقال توان انعطاف‌پذیر (FACTS) تغییرات شگرفی در شبکه‌ی انتقال از حیث بهره‌برداری بهتر از سیستم‌های موجود بدون از بین رفتن حاشیه‌ی پایداری مطلوب اتفاق افتاد. امروزه انواع مختلفی از ادوات FACTS موجود است که برخی به صورت سری و برخی موازی در شبکه قرار می‌گیرند. یکی از تأثیرگذارترین آن‌ها کنترل‌کننده‌ی یک‌پارچه‌ی عبور توان (UPFC) است که با توانایی کنترل پارامترهای مختلف شبکه، قابلیت‌های SSSC، STATCOM و TCPAR را ترکیب و به عنوان ابزاری چند منظوره مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

پایداری گذرا یکی از مهمترین مسائل پیش روی یک سیستم قدرت است که در صورت وقوع اغتشاش در سیستم، به سرعت در معرض خطر قرار می‌گیرد. در این پایان‌نامه با به‌کارگیری UPFC و کنترل آن با کنترل‌کننده‌ی عصبی- فازی هدف بهبود پایداری گذرا دنبال شده است. با توجه به این که تابع انرژی گذرای سیستم ابزار مناسبی برای بررسی مسئله‌ی پایداری است، بهینه‌سازی تابع انرژی UPFC به منظور دستیابی به بیشترین حاشیه‌ی پایداری گذرا مدنظر قرار می‌گیرد. این ایده، اساس تولید اطلاعات آموزش مورد نیاز در شبکه‌ی ANFIS به عنوان کنترل‌کننده‌ی UPFC قرار گرفته است. بررسی پایداری گذرا با محاسبه‌ی زمان بحرانی رفع خطا انجام می‌گیرد که افزایش آن به معنای بهبود پایداری گذرا و مسئله‌ای حیاتی در سیستم قدرت است.

مطالعه‌ی چگونگی تأثیر UPFC در نیل به هدف، با پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی دو سیستم انجام می‌شود: یکی سیستم تک‌ماشینه- شین بینهایت (SMIB) و دیگری سیستم ۹ باس IEEE. نتایج شبیه‌سازی کارآمدی روش پیشنهادی را در هر دو سیستم به اثبات می‌رساند. همچنین با شبیه‌سازی دیگر ادوات FACTS از جمله SSSC و STATCOM برتری UPFC با مقایسه‌ی نتایج به اثبات می‌رسد. با به‌کارگیری روش کنترل عصبی- فازی نیز با توجه به ترکیب توانایی آموزش شبکه‌های عصبی و سادگی قوانین فازی، انتظار کنترل مناسب‌تر به‌وسیله‌ی مقایسه‌ی نتایج حاصل با کارهای گذشته برآورده می‌گردد. تجزیه و تحلیل کاملی بر اساس نتایج حاصل انجام شده تا کارآمدی روش پیشنهادی به طور کامل اثبات گردد.

**کلمات کلیدی:** پایداری گذرای سیستم قدرت، تابع انرژی گذرا، کنترل عصبی-فازی، کنترل‌کننده‌ی

یکپارچه‌ی سیلان توان

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	6
مقدمه	6
۱-۱- ضرورت موضوع پایان نامه	۷
۲-۱- مرور کارهای گذشته	۸
۳-۱- چارچوب پایان نامه	۱۰
فصل دوم: مرور کلی مباحث	11
مقدمه	11
۱-۲- پایداری گذرا	۱۲
۱-۱-۲- دیدی مقدماتی از پایداری گذرا	۱۲
۲-۱-۲- معیار سطوح مساوی	۱۴
۳-۱-۲- عوامل مؤثر بر پایداری گذرا	۱۶
۴-۱-۲- سیستم‌های با چند ماشین	۱۷
۵-۱-۲- پایداری گذرای سیستم با چند ماشین	۲۰
۲-۲- مفاهیم اساسی قضیه‌ی لیاپانوف	۲۱
۱-۲-۲- مفهوم پایداری	۲۱
۲-۲-۲- روش مستقیم لیاپانوف	۲۱
۳-۲-۲- توصیف روش تابع انرژی گذرا	۲۲
۴-۲-۲- تحلیل پایداری سیستم‌های چندماشینه	۲۶
۳-۲- معرفی ادوات FACTS	۲۸
۱-۳-۲- محدودیت‌های استفاده‌ی کامل از شبکه‌های انتقال AC و روش‌های رویارویی	۲۹
۲-۳-۲- انواع اصلی کنترل‌کننده‌های FACTS	۳۰
۳-۳-۲- اهمیت نسبی انواع مختلف کنترل‌کننده‌های FACTS	۳۱
۴-۳-۲- ایده‌ی ادوات FACTS	۳۱
۵-۳-۲- مرور کنترل‌کننده‌های با اتصال سری	۳۲
۶-۳-۲- مرور کنترل‌کننده‌های با اتصال موازی	۳۴
۷-۳-۲- مرور کنترل‌کننده‌های با اتصال سری-موازی	۳۷
۸-۳-۲- مرور کنترل‌کننده‌های با اتصال سری-سری	۳۹
۴-۲- سیستم‌های هوشمند	۴۱
۱-۴-۲- معرفی شبکه‌های عصبی	۴۱
۲-۴-۲- معرفی سیستم‌های فازی	۴۲
3-4-2- مدل‌های عصبی-فازی	۴۳

50	فصل سوم: مدل سازی مسأله
50	مقدمه
51	۳-۱- کنترل کننده‌ی یکپارچه‌ی سیلان توان
51	۳-۱-۱- اصول اساسی عملکرد
53	۳-۱-۲- قابلیت‌های کنترل انتقال متداول
53	۳-۱-۳- مدل ریاضی
56	۳-۱-۴- تابع انرژی
58	۳-۲- استراتژی کنترل
58	۳-۲-۱- به کارگیری روش عصبی- فازی
59	۳-۲-۲- بهبود پایداری گذرا
61	فصل چهارم: نتایج شبیه سازی
61	مقدمه
62	۴-۱- ابزار شبیه سازی
62	۴-۲- شبیه سازی سیستم تک ماشینه
62	۴-۲-۱- عملکرد سیستم در حالت ماندگار
63	۴-۲-۲- عملکرد سیستم در صورت وقوع اختلال
73	۴-۳- شبیه سازی سیستم چندماشینه
73	۴-۳-۱- عملکرد سیستم در حالت ماندگار
74	۴-۳-۲- عملکرد سیستم در صورت وقوع اختلال
79	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
79	مقدمه
80	۵-۱- نتیجه گیری
81	۵-۲- پیشنهادات
82	پیوست ۱: روش‌های محاسبه‌ی انرژی بحرانی $V_{cr}$
84	پیوست ۲: شبکه‌های عصبی
88	پیوست ۳: سیستم‌های فازی
90	پیوست ۴: پارامترهای سیستم تک ماشینه
91	پیوست ۵: پارامترهای سیستم چند ماشینه
92	پیوست ۶: شماتیک شبیه سازی سیستم تک‌ماشینه به همراه جبران ساز
93	پیوست ۷: شماتیک شبیه سازی سیستم چند ماشینه به همراه جبران ساز
94	منابع و مأخذ



## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۳.....	شکل ۲-۱: نمایش سیستم شین بینهایت تک ماشینه همراه با مدارهای معادل آن
۱۳.....	شکل ۲-۲: منحنی زاویه- توان
۱۶.....	شکل ۲-۳: نمایش پدیده‌ی پایداری گذرا
۱۸.....	شکل ۲-۴: نمایش سیستم قدرت برای تجزیه و تحلیل پایداری گذرا
۲۲.....	شکل ۲-۵: نمایش توپ چرخان بر روی سطح داخلی یک کاسه
۲۴.....	شکل ۲-۶: نمایش معادل بودن روش انرژی گذرا و معیار سطوح مساوی
۲۵.....	شکل ۲-۷: ناحیه‌ی پایدار و تقریب محلی آن
۳۲.....	شکل ۲-۸: گروه کنترل کننده‌های FACTS مبتنی بر کانورتر منبع ولتاژی
۳۳.....	شکل ۲-۹: ولتاژ تزریقی کنترل شده بطور سری در خط انتقال
۳۴.....	شکل ۲-۱۰: مدل مداری یک TCSC
۳۴.....	شکل ۲-۱۱: مدل بلوکی یک SSSC
۳۵.....	شکل ۲-۱۲: جریان تزریقی کنترل شده بطور موازی در خط انتقال
۳۶.....	شکل ۲-۱۳: ساختار مداری یک SVC
۳۶.....	شکل ۲-۱۴: ساختار یک STATCOM و مدهای عملکردی آن
۳۷.....	شکل ۲-۱۵: ساختار مداری UPFC
۳۸.....	شکل ۲-۱۶: جابجاکننده فاز
۴۰.....	شکل ۲-۱۷: تشکیل IPFC از دو SSSC
.....	شکل ۲-۱۸: مکانیزم عملکرد سیستم استنباط فازی رسته یک TSK با دو ورودی، یک خروجی و دو قانون فازی
۴۵.....	شکل ۲-۱۹: ساختار انفیس
۵۱.....	شکل ۳-۱: نمایش مفهومی UPFC در یک سیستم قدرت دو ماشینه
۵۲.....	شکل ۳-۲: اجرای UPFC بوسیله‌ی دو کانورتر منبع ولتاژی پشت به پشت
۵۴.....	شکل ۳-۳: دیاگرام‌های فازوری نشان‌دهنده‌ی قابلیت‌های کنترل انتقال متداول توسط UPFC
۵۴.....	شکل ۳-۴: مدل پایه‌ای UPFC
۵۴.....	شکل ۳-۵: دیاگرام فازی
۵۵.....	شکل ۳-۶: مدل توان‌های تزریقی UPFC
۵۹.....	شکل ۳-۷: ساختار ANFIS
۶۰.....	شکل ۳-۸: سیستم SMIB با UPFC و بلوک‌های کنترلی
۶۳.....	شکل ۴-۱: سیستم تک ماشینه- شین بینهایت
۶۳.....	شکل ۴-۲: متغیرهای سیستم در حالت عملکرد عادی
۶۴.....	شکل ۴-۳: متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۲۰۰ میلی ثانیه بدون جبران‌سازی
۶۵.....	شکل ۴-۴: متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۲۴۰ میلی ثانیه با جبران‌سازی

- شکل ۴-۵: مقایسه‌ی متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۲۵۰ میلی ثانیه در دو حالت با جبران و بدون جبران ..... ۶۵
- شکل ۴-۶: نمودار صفحه فاز سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۲۵۰ میلی ثانیه در دو حالت با جبران و بدون جبران ..... ۶۶
- شکل ۴-۷: توابع عضویت ورودی‌های کنترل کننده ANFIS قبل و بعد از آموزش ..... ۶۷
- شکل ۴-۸: زاویه‌ی شاخه‌ی سری UPFC ..... ۶۷
- شکل ۴-۹: منحنی نوسان ماشین در حالات مختلف ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۰: توابع عضویت ورودی‌های ولتاژ و زاویه‌ی ماشین و خروجی ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۱: مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با روش مرجع [۲۰] ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۲: سیستم ۹ باس IEEE ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۳: متغیرهای سیستم در حالت عملکرد عادی ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۴: متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۱۱۰ میلی ثانیه بدون جبران‌سازی ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۵: مقایسه‌ی متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۱۳۴ میلی ثانیه در دو حالت با جبران و بدون جبران ..... ۷۷
- شکل ۴-۱۶: زاویه‌ی ولتاژ شاخه‌ی سری UPFC ..... ۷۸
- شکل پ ۲-۱: مدل نرون تک ورودی ..... ۸۴
- شکل پ ۲-۲: مدل چند ورودی یک نرون ..... ۸۵
- شکل پ ۲-۳: پرسپترون تک لایه ..... ۸۶
- شکل پ ۲-۴: شبکه همینگ ..... ۸۷
- شکل پ ۲-۵: شبکه هاپفیلد گسسته ..... ۸۷
- شکل پ ۳-۱: ساختار اصلی سیستم‌های فازی خالص ..... ۸۸
- شکل پ ۳-۲: ساختار اصلی سیستم فازی TSK ..... ۸۹
- شکل پ ۳-۳: ساختار اصلی سیستم‌های فازی با فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز ..... ۸۹

## فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: الگوریتم آموزش ترکیبی در مدل انفیس .....	۴۹
جدول ۱-۴: مقایسه‌ی زمان بحرانی رفع خطا در حالت مختلف .....	۶۸
جدول ۲-۴: قوانین فازی برای کنترل فازی UPFC .....	۷۰
جدول ۳-۴: مقایسه‌ی زمان بحرانی رفع خطا در حالت کنترل فازی با کنترل عصبی- فازی .....	۷۱
جدول ۴-۴: مقایسه‌ی زمان بحرانی رفع خطا در حالات مختلف برای سیستم چندماشینه .....	۷۸

## فصل اول

### مقدمه

### مقدمه

در این فصل ابتدا با اشاره‌ای کوتاه به مسائل مربوط به سیستم قدرت با نگاه ویژه به پایداری از یک سو و ابزار و روش‌های کنترلی که در دست است از جمله ادوات FACTS و کنترل‌کننده‌ی عصبی-فازی از سوی دیگر، به ضرورت انجام این تحقیق پرداخته و سپس مروری بر کارهای گذشته در ابعاد مختلف خواهد آمد. در پایان، نمای کلی پایان‌نامه با مرور اجمالی فصول ترسیم شده است.

## ۱-۱- ضرورت موضوع پایان نامه

در سال‌های اخیر به علت تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، بسیاری از ویژگی‌های اقتصادی و فنی صنعت برق در بخش‌های مختلف از جمله تولید، انتقال، توزیع و مصرف تحت تأثیر قرار گرفته است. به ویژه شبکه‌های انتقال که بارگذاری خطوط آن‌ها معمولاً در نزدیکی حد دمایی خود بوده و از محدوده‌ی حاشیه‌ی پایداری خود تجاوز می‌کنند. از عمده دلایل آن می‌توان به مشکل بودن احداث خطوط جدید و یا در بعضی از موارد غیرممکن بودن آن به علت ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی اشاره نمود. بنابراین برای دستیابی به سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان میبایست استراتژی‌های کنترلی ویژه‌ای به کار گرفته شود که نه تنها در حالت کارکرد عادی سیستم بلکه پس از ایجاد تغییرات ساختاری قابل ملاحظه مثل خارج شدن واحدهای تولید، خطوط انتقال و یا تغییر شرایط بار، تداوم تأمین نیاز مصرف‌کننده از دست نرود.

دو مسئله‌ی اصلی برای ارتقاء عملکرد سیستم قدرت، برنامه‌ریزی و پایداری می‌باشند. برنامه‌ریزی عبارتست از تنظیم بلند مدت ولتاژها و توان برای برقراری شرایط کاری مورد نظر سیستم (حالت ماندگار). عمل پایداری میبایست به صورت پیوسته و در تمامی شرایط کاری سیستم انجام گیرد تا از ناپایدار شدن سیستم جلوگیری شود. پایداری سیستم‌های قدرت به دو صورت پایداری ولتاژ و پایداری زاویه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. ناپایداری استاتیک یا ناپایداری ولتاژ بر اثر تغییرات آهسته و مداوم بار در سیستم قدرت رخ می‌دهد. پایداری زاویه‌ای در سیستم‌های قدرت متناسب با دامنه‌ی اغتشاشات و فرکانس آن‌ها در دو حالت دینامیک و گذرا مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی ادوات الکترونیک قدرت در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ منجر به ساخت سیستم‌های انتقال متناوب انعطاف‌پذیر<sup>۱</sup> گردید. این ادوات کنترل‌پذیری ولتاژ و توان را برای افزایش بهره‌وری و پایداری سیستم‌های موجود افزایش می‌دهند. امروزه این ادوات نقش مهمی را در بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های قدرت ایفا می‌کنند.

تاکنون از روش‌های کنترلی متفاوتی جهت کنترل ادوات FACTS استفاده شده است. اگر چه یکی از ویژگی‌های مهم و اساسی طراحی کنترل‌کننده به روش فازی، استفاده از دانسته‌های انسان در تمامی مراحل طراحی می‌باشد، اما با به کار بردن برخی روش‌ها می‌توان پارامترهای کنترل‌کننده را به نحوی تغییر داد که منجر به عملکرد بهتر آن شود.

تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌های طراحی شده فازی می‌تواند با استفاده از شبکه‌های عصبی و سیستم عصبی- فازی انجام شود. تنظیم پارامترها به صورت غیر بهنگام بوده و این عمل بر اساس داده‌های آموزش تعریف شده توسط طراح انجام می‌شود. شبکه‌های عصبی و منطق فازی دو تکنیک مکمل هستند. شبکه‌های عصبی می‌توانند از طریق داده‌ها و فیدبک بیاموزند، با این وجود فهم خبرگی یا الگوی آموخته شده‌ی شبکه‌های عصبی مشکل می‌باشد. در عوض مدل‌های قانونمند فازی به سادگی قابل فهم می‌باشند، زیرا از عبارات بیانی و ساختار قوانین اگر- آنگاه استفاده می‌کنند. برخلاف شبکه‌های عصبی، منطق فازی دارای

<sup>۱</sup>. FACTS: Flexible AC Transmission Systems

الگوریتم آموزش نمی‌باشد. آموزش و شناسایی مدل‌های فازی، نیازمند اتخاذ تکنیک‌هایی از زمینه‌های دیگر می‌باشد. از آنجایی که شبکه‌های عصبی می‌توانند بیاموزند، منطقی است که این دو تکنیک را با هم ترکیب کنیم. این ترکیب سیستم عصبی- فازی را ایجاد می‌کند.

بنابر توضیحات داده شده، پایداری گذرا یکی از مسائل مهمی است که یک سیستم قدرت با آن روبروست. در برنامه‌ریزی سیستم قدرت، بایستی تدابیر لازم برای خطاهای متداول اندیشیده شود تا از ناپایداری و صدمات مربوطه جلوگیری به عمل آید. یکی از ابزارهایی که امروزه مورد توجه بسیار قرار گرفته، ادوات FACTS است. در اینجا با توجه به این که UPFC<sup>۱</sup> کارآمدترین ابزار در بین ادوات FACTS است از آن برای دستیابی به هدف بهبود پایداری گذرا استفاده شده است. از سوی دیگر با توجه به غیرخطی بودن سیستم قدرت و دشواری مدل‌سازی، با در نظر گرفتن قابلیت‌های روش کنترل عصبی-فازی، این روش برای کنترل UPFC انتخاب شد. در این بین استفاده از تابع انرژی، شیوهی مناسبی برای پایداری به نظر می‌رسد.

## ۱-۲- مرور کارهای گذشته

مفهوم کنترل‌کننده‌ی یک‌پارچه‌ی سیلان توان در سال ۱۹۹۱ عرضه و اولین مقاله‌ای که به شرح و بسط کامل این ابزار جدید پرداخت در سال ۱۹۹۵ توسط تیمی به رهبری گایوگی منتشر شد [۱]. این مقاله اساس کاربرد UPFC را برای کنترل مستقل P و Q و مدهای مختلف عملکرد آن شرح می‌داد و به مقایسه‌ی تفصیلی آن با دیگر ادوات FACTS اعم از TCSC<sup>۲</sup> و TCPAR<sup>۳</sup> پرداخت. در واقع این مقاله پایه و اساس تمامی کارهایی است که پس از آن به ابعاد مختلف عملکرد و کنترل UPFC در سیستم قدرت پرداخت.

اولین UPFC در جهان با مقدار نامی  $\pm 320$  مگاوات آمپر در نیمه‌ی سال ۱۹۹۸ در پروژه‌ای با حمایت مشترک انستیتوی تحقیقات برق<sup>۴</sup> و AEP<sup>۵</sup> توسط شرکت وستینگهاس الکتریک<sup>۶</sup>، به منظور پشتیبانی ولتاژ و کنترل سیلان توان راه‌اندازی شد. پس از آن تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی بکارگیری UPFC برای بهبود مشخصات سیستم قدرت و یا چگونگی کنترل آن صورت گرفت [۲].

مرجع [۳] با هدف بهبود پایداری گذرا به کارکرد UPFC پرداخته است. در این تحقیق، اساس کار بر پایه‌ی مدل ریاضی UPFC است که تعامل بین پارامترهای سیستم انتقال، شرایط عملکرد و پارامترهای UPFC را با معادلات ریاضی آنالیز می‌کند. در این مقاله ثابت می‌شود که برای دستیابی به بیشترین حاشیه‌ی پایداری گذرا با کمک UPFC، دامنه‌ی ولتاژ شاخه‌ی سری و جریان راکتیو شاخه‌ی موازی باید در ماکزیمم مقدار خود متناسب با مقادیر نامی UPFC قرار گیرند. در [۴] مطالعات جامعی در مورد مدل ریاضی UPFC در حالت دائمی<sup>۷</sup>، پایداری گذرا و مقادیر ویژه صورت گرفته است. بر اساس مدل ارائه شده، تأثیر روش

<sup>1</sup> Unified Power Flow Controller

<sup>2</sup> Thyristor Controlled Series Capacitor

<sup>3</sup> Thyristor Controlled Phase Angle Regulator

<sup>4</sup> EPRI: Electric Power Research Institute

<sup>5</sup> American Electric Power

<sup>6</sup> Westinghouse Science & Technology Center

<sup>7</sup> steady state

کنترلی، محل قرارگیری UPFC و پارامترهای آن در مشخصات سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۵] با کمک UPFC که در حالت کنترل ولتاژ عمود به کار گرفته شده، هدف بهبود پایداری گذرا را دنبال نموده است؛ همچنین مقایسه‌ای بین UPFC با SSSC<sup>۱</sup> و STATCOM<sup>۲</sup> در بهبود پایداری گذرا صورت داده است. مرجع [۶] نیز به بهبود پایداری گذرا با استفاده از UPFC پرداخته است. مطالعات انجام شده بر روی UPFC، شبیه‌سازی و مدل‌سازی آن بسیار است؛ از جمله دیگر کارهای پایه‌ای انجام شده که به مدل‌سازی و شبیه‌سازی UPFC در نرم‌افزارهای Matlab و EMTP پرداخته مراجع [۷-۱۰] می‌باشند. [۱۱] نیز کنترل گسسته‌ی UPFC را با ماکزیمم و مینیمم کردن سیلان توان خط توسط UPFC و با هدف بهبود پایداری گذرا مد نظر قرار داده است.

کاربرد روش مستقیم پایداری لیاپانوف در دهه‌ی ۱۹۸۰ مورد توجه قرار گرفت [۱۲-۱۴]. [۱۵] اساس کار بسیاری از کارهای انجام شده در بکارگیری تابع لیاپانوف در شبکه‌های قدرت با وجود ادوات FACTS است. مرجع [۱۶] با در نظر گرفتن تابع انرژی برای یک ماشین یا گروهی از ماشین‌ها که ماشین بحرانی نامیده به بررسی پایداری پرداخته است. این رویکرد در سیستم‌های چند ماشینه خصوصاً با تعداد ماشین زیاد، بسیار مفید و اساس کار بسیاری از تحقیقات پس از آن قرار گرفته است. در این مقاله انرژی بحرانی ماشین (که می‌تواند متشکل از گروهی از ماشین‌ها باشد) با استخراج انرژی‌های جنبشی و پتانسیل شبکه با در نظر گرفتن مرجع COI<sup>۳</sup> تعریف و پایداری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. [۱۷] و [۱۸] به منظور کنترل بهینه‌ی UPFC در سیستم قدرت از روش مستقیم لیاپانوف بهره برده‌اند. در مرجع [۱۷] با هدف دستیابی به ماکزیمم حد پایداری گذرا، با تعریف تابع انرژی بحرانی برای UPFC و کنترل مناسب آن، ماکزیمم نمودن انرژی پتانسیل کلی شبکه مورد توجه قرار گرفته است. مواردی از کاربرد روش مستقیم لیاپانوف برای کنترل UPFC با هدف میرا کردن نوسانات سیستم نیز وجود دارد [۱۹].

سیستم‌های هوشمند در کنترل ادوات FACTS همانند دیگر کاربردهای آن به سرعت مورد توجه قرار گرفت. از جمله می‌توان به استفاده از کنترل فازی UPFC با هدف بهبود پایداری گذرا اشاره نمود. در مرجع [۲۰] با طراحی دو کنترل‌کننده‌ی فازی یکی برای محاسبه‌ی توان لازم برای میل به هدف بهبود پایداری گذرا و دیگری برای کنترل پارامترهای UPFC با هدف تولید توان محاسبه شده، به کنترل هوشمند UPFC پرداخته است.

در برخی مقالات نیز به کاربرد شبکه‌های عصبی در کنترل ادوات FACTS از جمله UPFC پرداخته شده است [۲۱]. کنترل UPFC با شبکه عصبی بر پایه‌ی قضیه‌ی لیاپانوف به منظور بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت در [۲۲] مد نظر قرار گرفته است. در مرجع [۲۳] سه ابزار SSSC، STATCOM و UPFC که با کنترل‌کننده‌ی RBFN کنترل شده و عملکرد آن‌ها در بهبود پایداری گذرا مورد مقایسه قرار گرفته است.

با مطرح شدن روش‌های متنوع کنترل فازی-عصبی، کاربرد آن به مباحث مختلف قدرت نیز راه یافت. از جمله روش‌های عصبی-فازی، ANFIS<sup>۴</sup> است که اولین بار در سال ۱۹۹۳ در مقاله‌ای پیشنهاد و به تفصیل

<sup>۱</sup> Static Synchronous Series Capacitor

<sup>۲</sup> Static Compensator

<sup>۳</sup> Center Of Inertia

<sup>۴</sup> Adaptive Network Fuzzy Inference System

شرح داده شد [۲۴]. با وجود کارآمدی این روش کنترلی و محاسن قابل توجه آن، در حوزه‌ی سیستم‌های قدرت کم استفاده مانده است. از جمله مواردی که از ANFIS برای کنترل ادوات FACTS استفاده شده می‌توان به [۲۵] اشاره نمود که در آن ANFIS برای کنترل STATCOM با هدف بهبود پایداری گذرا مورد توجه قرار گرفته است. کاربرد ANFIS در کنترل UPFC در مرجع [۲۶] با هدف میراسازی نوسانات فرکانس پایین مد نظر قرار گرفته است. در این مرجع از روش hybrid به منظور آموزش کنترل کننده ANFIS استفاده شده و بر پایه مدل خطی شده Philips-Hefron سیستم قدرت با وجود UPFC، عملکرد آن در میراسازی نوسانات در شرایط مختلف بررسی و برتری کنترل کننده ANFIS بر کنترل کننده با بهره ثابت را به اثبات رسانده است. دیگر روش‌های فازی-عصبی در برخی مراجع از جمله [۲۷] مورد توجه قرار گرفته است.

با بررسی مراجع اشاره شده کاربرد کنترل کننده‌ی هوشمند ANFIS برای UPFC با هدف بهبود پایداری گذرا و با تکیه بر تابع انرژی، موضوعی نو و روشی نوین در حوزه‌ی سیستم‌های قدرت به نظر می‌رسد.

### ۱-۳- چارچوب پایان نامه

در فصل اول این پایان نامه ابتدا با اشاره‌ای کوتاه به مسائل مربوط به سیستم قدرت به ضرورت انجام این تحقیق پرداخته و سپس مروری بر کارهای گذشته در ابعاد مختلف خواهد. در فصل دوم با مرور مباحث کلی که پایه و اساس پایان نامه می‌باشد، آشنایی اولیه برای ورود به مباحث اصلی صورت می‌گیرد. مفهوم پایداری گذرا، مفاهیم اساسی قضیه‌ی لیاپانوف، روش تابع انرژی گذرا به منظور بررسی پایداری گذرا و چگونگی تعمیم این روش برای سیستم قدرت توصیف می‌گردد. پس از آن به مرور مختصر و کلی ادوات FACTS پرداخته خواهد شد. سپس با مرور سریع شبکه‌های عصبی و فازی، زمینه‌سازی لازم برای معرفی مدل‌های عصبی-فازی صورت گرفته و شبکه‌ی ANFIS به‌طور تفصیلی شرح داده می‌شود.

در فصل سوم به ارائه‌ی مدل و فرموله کردن مسئله پرداخته شده است. به اصول اساسی عملکرد به همراه ساختمان داخلی، همچنین قابلیت‌های کنترل UPFC اشاره شده؛ پس از آن مدل ریاضی و روابطی که در طی حل مسئله مبنای کار بوده به همراه تابع انرژی استخراج شده برای UPFC بحث شده است؛ سپس استراتژی کنترل شامل شیوه‌ی به‌کارگیری روش عصبی-فازی و چگونگی میل به هدف بهبود پایداری گذرا توضیح داده شده است.

در فصل چهارم نیز با ارائه‌ی نمودارها و جداولی تحقق هدف پایداری گذرا از طریق جبران‌سازی سیستم با UPFC کنترل شده با کنترل کننده‌ی ANFIS اثبات می‌گردد.

فصل پنجم به نتیجه‌گیری نهایی و ارائه‌ی پیشنهادات خواهد پرداخت. در بخش پیوست نیز برخی اطلاعات تکمیلی و پارامترهای سیستم آمده است.



## فصل دوم

### مرور کلی مباحث

#### مقدمه

در این فصل با مرور مباحث کلی که پایه و اساس پایان‌نامه می‌باشد، آشنایی اولیه برای ورود به مباحث اصلی صورت می‌گیرد. در ابتدا، مفهوم پایداری گذرا با بکارگیری معیار سطوح برابر روشن می‌گردد. سپس با توضیح مفاهیم اساسی قضیه‌ی لیاپانوف، آمادگی لازم برای شرح روش تابع انرژی گذرا به منظور بررسی پایداری گذرا ایجاد خواهد شد. در ادامه‌ی آن، چگونگی تعمیم این روش برای سیستم قدرت توصیف می‌گردد. پس از آن به مرور مختصر و کلی ادوات FACTS با اشاره‌ای سریع به انواع مختلف آن و چگونگی تأثیرگذاری بر سیستم قدرت پرداخته خواهد شد. سرانجام، در بخش سیستم‌های هوشمند با مرور سریع شبکه‌های عصبی و فازی، زمینه‌سازی لازم برای معرفی مدل‌های عصبی- فازی صورت می‌گیرد؛ شبکه‌ی ANFIS به‌طور تفصیلی شرح داده می‌شود، اما به معرفی مختصر دیگر انواع شبکه‌های عصبی- فازی بسنده می‌گردد.

## ۲-۱- پایداری گذرا

پایداری گذرا توانایی سیستم قدرت در حفظ سنکرونیزم<sup>۱</sup> است هنگامی که تحت تأثیر اغتشاش گذرای شدیدی مانند خرابی وسایل انتقال، از دست دادن تولید یا از دست دادن یک بار بزرگ، قرار گیرد. پاسخ سیستم به چنین اغتشاش‌هایی تغییرات بزرگی را در زوایای روتور ژنراتور، توان‌های انتقالی، ولتاژ شین‌ها و سایر متغیرهای سیستم به وجود می‌آورد. پایداری از مشخصه‌های غیرخطی سیستم قدرت، تأثیر می‌پذیرد. اگر جدایی زاویه‌ای پدیدآمده بین ماشین‌های سیستم، درون کران‌های معینی باقی بماند، سیستم سنکرونیزم را حفظ خواهد کرد. اما اگر سنکرونیزم، به واسطه‌ی ناپایداری گذرا از دست برود، پس از ۲ تا ۳ ثانیه از بروز اغتشاش اولیه، معلوم خواهد شد [۲۸].

### ۲-۱-۱ دیدی مقدماتی از پایداری گذرا

سیستم نشان داده شده در شکل ۲-۱(الف)، شامل یک ژنراتور تأمین‌کننده‌ی توان به یک سیستم بزرگ نمایش داده شده با یک شین بینهایت از طریق دو مدار انتقال است. شین بینهایت نماینده‌ی منبع ولتاژی با دامنه و فرکانس ثابت است. کلیه‌ی مقاومت‌ها نادیده گرفته شده‌اند، ژنراتور با مدل کلاسیک نشان داده شده است و از اثر گاورنر سرعت چشمپوشی می‌شود. سیستم مذکور در شکل ۲-۱(ب) نمایش داده شده است. ولتاژ متصل به راکتانس گذرا ( $E_d$ ) با  $E$  نشان داده شده است. زاویه‌ی روتور،  $\delta$ ، زاویه‌ای است که  $E$  به اندازه‌ی آن از  $E_B$  پیش می‌افتد. هنگامی که سیستم اندکی تغییر می‌کند، اندازه‌ی  $E$  در مقدار قبل از اغتشاش، ثابت باقی می‌ماند و  $\delta$  با منحرف شدن سرعت روتور ژنراتور از سرعت سنکرون  $\omega_0$ ، تغییر می‌کند. می‌توان مدل سیستم را به شکل ۲-۱(ج) کاهش داد و سپس با روش‌ها تحلیلی ساده، مدل کاهش یافته را بررسی کرد. این کار در به‌دست دادن فهمی پایه‌ای از پدیده‌ی پایداری گذرا سودمند است. خروجی توان الکتریکی ژنراتور برابر است با:

$$P_e = \frac{E' E_B}{X_T} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (۱-۲)$$

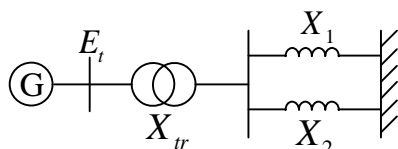
که در آن:

$$P_{max} = \frac{E' E_B}{X_T} \quad (۲-۲)$$

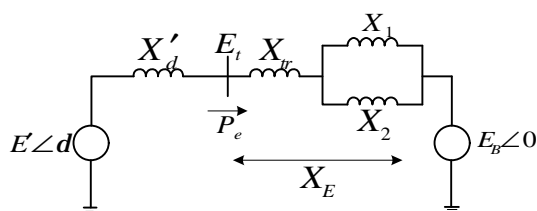
رابطه‌ی توان-زاویه، به صورت ترسیمی و با هر دو مدار انتقال در حال کار در شکل ۲-۲ با منحنی شماره‌ی ۱ نشان داده شده است. با ورودی توان مکانیکی  $P_m$ ، خروجی توان الکتریکی حالت ماندگار  $P_e$  برابر  $P_m$  است و نقطه کار توسط نقطه‌ی  $a$  بر روی منحنی نمایش داده شده است. اگر یکی از مدارها خارج از کار

<sup>۱</sup> Synchronism

باشد، راکتانس مؤثر  $X_T$  بیشتر خواهد بود. رابطه‌ی توان- زاویه در این حالت، با منحنی شماره ۲ نشان داده شده است. در این حالت، توان حداکثر کمتر است. در حین یک اغتشاش نوسان  $\delta$  بر روی سرعت سنکرون  $\omega_0$  سوار می‌شود، لیکن انحراف سرعت  $(\Delta\omega_r = d\delta/dt)$  بسیار کوچک‌تر از  $\omega_0$  است. بنابراین، سرعت ژنراتور عملاً برابر با  $\omega_0$  می‌باشد و گشتاور فاصله‌ی هوایی را در مبنای واحد (pu) می‌توان برابر با توان مبنای واحد فاصله‌ی هوایی در نظر گرفت. از این رو هنگام مراجعه به معادله‌ی نوسان، گشتاور و توان را به جای هم استفاده می‌کنیم.



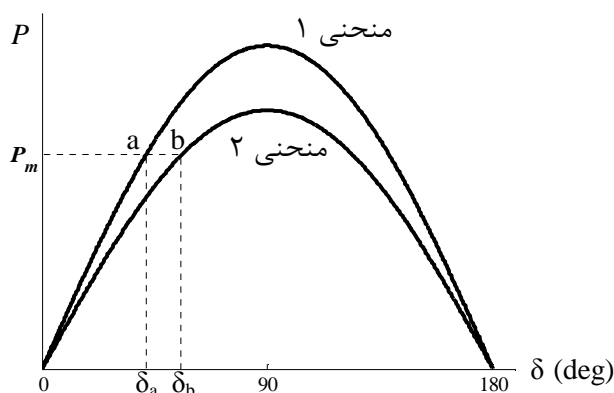
(الف) سیستم شین بینهایت تک ماشینه



(ب) مدار معادل

(ج) مدار معادل کاهش یافته

شکل ۲- ۱: نمایش سیستم شین بینهایت تک ماشینه همراه با مدارهای معادل آن [۲۸]



شکل ۲- ۲: منحنی زاویه- توان

معادله ی حرکت یا معادله ی نوسان را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \sin \delta \quad (3-2)$$

که در آن،  $P_{max}$  حداکثر توان الکتریکی خروجی بر حسب pu،  $H$  ثابت لختی بر حسب MWS/MVA و  $t$  زمان بر حسب ثانیه است [۲۸].

## ۲-۱-۲- معیار سطوح مساوی

برای مدل مفروض سیستم در قسمت قبل، لازم نیست برای تعیین وضعیت نوسان زاویه ی روتور، معادله ی نوسان به طور دقیق حل شود ولی می توان اطلاعات مربوط به حداکثر زاویه ی گردش  $\delta_m$  و حد پایداری را به صورت ترسیمی و با به کارگیری نمودار زاویه-توان به دست آورد. اگرچه این روش به سیستم های چند ماشینه، با نمایش تفصیلی از ماشین های سنکرون قابل اعمال نیست، اما به درک عوامل اساسی مؤثر بر پایداری گذرای هر سیستمی کمک می کند.

از معادله ی (۳-۲)، رابطه ی زیر بین زاویه ی روتور و توان شتاب دهنده به دست می آید:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \quad (4-2)$$

ملاحظه می شود  $P_e$  تابعی غیرخطی از  $\delta$  است، و بنابراین نمی توان معادله ی بالا را مستقیماً حل کرد. با ضرب طرفین معادله ی فوق در  $2d\delta/dt$ :

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0 (P_m - P_e)}{H} \frac{d\delta}{dt} \quad (5-2)$$

یا:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{d\delta}{dt} \right]^2 = \frac{\omega_0 (P_m - P_e)}{H} \frac{d\delta}{dt} \quad (6-2)$$

و انتگرال گیری نتیجه می دهد:

$$\left[ \frac{d\delta}{dt} \right]^2 = \int \frac{\omega_0 (P_m - P_e)}{H} d\delta \quad (7-2)$$

در ابتدا، انحراف سرعت  $d\delta/dt$  صفر است. اما بر اثر اغتشاش، تغییر خواهد کرد. برای عملکرد پایدار، باید انحراف زاویه ی  $\delta$  کراندار باشد و به یک مقدار حداکثر برسد و سپس تغییر جهت دهد. برای این منظور باید انحراف سرعت  $d\delta/dt$  زمانی پس از اغتشاش صفر شود. بنابراین، از معادله ی (۷-۲) به عنوان معیاری از پایداری می توان نوشت:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_m} \frac{\omega_0 (P_m - P_e)}{H} d\delta = 0 \quad (8-2)$$