بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

گروه مهندسی برق

گرایش قدرت

افزایش میرایی نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت با استفاده از کنترل محلی UPFC

نگارش:

محمدعلی هادی

استاد راهنما:

دکتر علی کرمی

شهریور ماه ۱۳۹۳

«إن فی خلق السموات و الارض واختلاف اللیل و النهار والفلک التی تجری فی البحر بما ینفع الناس وما انزل اللّه من السماء من ماء فأحیا به الارض بعد موتها وبث فیها من کل دابة و تصریف الریاح و السحاب المسخر بین السماء والأرض لآیات لقوم یعقلون»

سوره بقره، آیه ۱۶۴

بنام خداوند جان و خرد — کزین برتر اندیشه برنگذرد

خداوند نام و خداوندرای — خداوند روزی ده رهنمای

خرد راه و جان راهبی سنجد اوی — در اندیشه سخت کی گنجد اوی

کنون ای خردمند وصف خرد — بدین جایگه گفتن اندر خورد

خرد بهتر از هرچه ایزد بداد — ستایش خرد را به از راه داد

خرد چشم جان است چون بنگری — تو بی چشم شادان جهان نسپری

حمد و سپاس خدای را که به حقیر فرصت دانش آموزی عطا فرمود.

تقدیم به روان مادرم که دعایش چراغ راهم و یادش آرام جانم است؛

و پدر گرانقدرم جناب آقای دکتر محمدباقر هادی و برادران عزیزم آقایان وحید و حامد

که صبورانه در طول این مدت پشتیبانم بودند.

سزاوار است از تمامی عزیزانی که در انجام این پژوهش مرا یاری کرده‌اند، سپاسگزاری نمایم.

از محضر استاد راهنمای گرانقدرم، جناب آقای دکتر علی کرمی به خاطر راهنمایی‌ها و همراهی‌های بی دریغشان در تمامی مراحل این پایان نامه، که در مقام شاگردی این استاد عزیز و بزرگوار بسیار آموخته‌ام، صمیمانه سپاسگزارم.

همچنین از اساتید بزرگوارم، جناب آقای دکتر سید مسعود مقدس تفرشی و جناب آقای دکتر اسماعیل فلاح چولابی که در سمت ممتحن زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه را بر عهده داشته‌اند، بینهایت سپاسگزارم.

در پایان از تمامی عزیزانی که در این مدت با من همراه بوده‌اند و از همفکری و همیاری‌هایشان بهره برده‌ام، نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم.

محمدعلی هادی شهریورماه ۱۳۹۳

فهرست مطالب

فهرست مطالب ..... ث

فهرست شکل‌ها ..... د

فهرست جدول‌ها ..... ز

چکیده ..... س

چکیده انگلیسی ..... ش

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده ۴

۱-۳- ساختار پایان نامه ۴

فصل دوم: پایداری سیستم‌های قدرت ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۱-۱- طبقه بندی پدیده‌های گذرا و دینامیکی در سیستم‌های قدرت ۸

۲-۲- نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت ۹

۲-۳- ضرورت مطالعات نوسانات در سیستم‌های قدرت ۱۰

۲-۴- معادله نوسان ۱۰

۲-۵- دیدی مقدماتی از پایداری گذرا ۱۵

۲-۵-۱- پاسخ به تغییر پله‌ای در P_m ۱۷

۲-۵-۲- معیار سطوح برابر ۱۸

۲-۵-۳- پاسخ به خطای اتصال کوتاه ۲۰

۲-۵-۴- عوامل موثر بر پایداری گذرا ۲۱

۲-۶- اهمیت میراسازی نوسانات توان ۲۲

۲-۷- پایدار ساز سیستم قدرت (PSS) ۲۲

۲-۷-۱- نمایش کلی سیستم SMIB خطی ۲۳

۲-۷-۲- اعمال PSS به سیستم تحریک ۲۴

۲-۷-۳- طراحی PSS ۲۵
۲-۸- بستن سریع شیر ۲۶
۲-۹- قطع کردن ژنراتور ۲۶
۲-۱۰- عناصر موازی ۲۷
۲-۱۱- عناصر سری ۲۷
۲-۱۱-۱- مثالی از جبران ساز سری با کنترل (Bang-Bang) ۲۷
فصل سوم: ادوات FACTS ۳۰
۳-۱- مقدمه ۳۱
۳-۲- اصول عملکرد UPFC ۳۱
۳-۳- مدل سیستم قدرت به همراه UPFC ۳۳
۳-۳-۱- فرضیات ۳۳
۳-۳-۲- نسبت تبدیل غیر اسمی ۳۵
۳-۳-۲- معادلات گره شبکه ۳۶
۳-۳-۳- معادلات توان ۳۸
۳-۳-۴- معادلات نوسان ۴۰
فصل چهارم: تابع انرژی ۴۲
۴-۱- مقدمه ۴۳
۴-۲- جنبه‌های ریاضی و فیزیکی مساله ۴۳
۴-۲-۱- محاسبه زمان رفع خطای بحرانی (t_{cr}) ۴۴
۴-۳- روش مستقیم لیاپانوف ۴۵
۴-۳-۱- استفاده از انتگرال اول حرکت برای بدست آوردن تابع انرژی ۴۵
۴-۳-۲- اتلاف انرژی ۴۶
۴-۴- استراتژی کنترلی بر اساس روش مستقیم لیاپانوف ۴۷
۴-۴-۱- کنترل بر اساس متغیرهای حالت ۴۷
۴-۴-۲- کنترل بر اساس اندازه گیری محلی ۴۸

۴-۴-۲-۱- خواص دینامیکی اندازه گیری محلی ۴۹
۴-۴-۲-۲- انتخاب سیگنال‌ها ۴۹
۴-۴-۲-۳- نحوه مشتق گیری ۵۰
۴-۵- نتایج شبیه سازی ۵۲
۴-۵-۱- محاسبه انرژی V_{cr} و t_{cr} ۵۳
۴-۵-۲- نقش UPFC در افزایش زمان رفع خطای بحرانی ۵۶
۴-۵-۳- خطای سه فاز self-clearing روی باس ژنراتور ۵۷
۴-۵-۴- خطای سه فاز line-outage در باس ژنراتور ۶۰
۴-۵-۵- خطای سه فاز self-clearing در وسط یکی از خطوط ۶۴
۴-۵-۶- خطای سه فاز line-outage در وسط یکی از خطوط ۶۶
۴-۵-۷- ۵٪ افزایش در توان مکانیکی ورودی ۶۷
۴-۵-۸- تاثیر ضرایب بهره UPFC بر شدت میرایی ۷۰
فصل پنجم: الگوریتم PSO ۷۳
۵-۱- مقدمه ۷۴
۵-۲- تاریخچه ۷۴
۵-۳- انواع توپولوژی و اصل همسایگی ۷۵
۵-۳-۱- توپولوژی ستاره ۷۵
۵-۳-۲- توپولوژی حلقه ۷۶
۵-۳-۳- توپولوژی چرخی ۷۶
۵-۴- الگوریتم اجتماع پرندگان ۷۶
۵-۴-۱- الگوریتم بهترین فردی ۷۶
۵-۴-۲- الگوریتم بهترین جهانی ۷۷
۵-۴-۳- الگوریتم بهترین محلی ۷۸
۵-۵- تعیین شایستگی ۷۹
۵-۶- همگرایی ۷۹

۵-۷- تابع هدف ۸۲
۵-۸- بدست آوردن مقادیر بهینه ضرایب بهره UPFC ۸۲
۵-۸-۱- نتایج شبیه سازی برای شرایط نامی سیستم ۸۳
۵-۸-۲- نتایج شبیه سازی برای یک نقطه کار تصادفی ۸۶
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۹۰
۶-۱- نتیجه گیری ۹۱
۶-۲- پیشنهاد برای ادامه کار ۹۱
مراجع ۹۲

فهرست شکل‌ها

شکل (۲-۱): محدوده زمانی پدیده‌های مختلف در مطالعه دینامیک سیستم‌های قدرت ۹

شکل (۲-۲): نمایش فازوری برداری ترکیب شده برای ژنراتور رتور استوانه‌ای ۱۱

شکل (۲-۳): سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت ۱۵

شکل (۲-۴): نمایش سیستم همراه با ژنراتور نشان داده شده توسط مدل کلاسیک ۱۶

شکل (۲-۵): رابطه توان-زاویه ۱۷

شکل (۲-۶): پاسخ به تغییر پله‌ای در ورودی توان مکانیکی ۱۸

شکل (۲-۷): نمایش پدیده پایداری گذرا ۲۰

شکل (۲-۸): بلوک دیاگرام کلی یک سیستم SMIB خطی شده ۲۳

شکل (۲-۹): دیاگرام فیزوری گشتاورهای ΔT_{e1} و ΔT_{e2} ۲۴

شکل (۲-۱۰): بلوک دیاگرام حلقه کنترل مکمل AVR ۲۴

شکل (۲-۱۱): دیاگرام فیزور حلقه کنترل مکمل AVR ۲۵

شکل (۲-۱۲): عناصر اصلی PSS ۲۵

شکل (۲-۱۳): سیستم SMIB با جبران ساز سری ۲۸

شکل (۲-۱۴): نوسانات زاویه رتور ۲۹

شکل (۲-۱۵): نوسانات توان ۳۰

شکل (۳-۱): مبدل پایه UPFC ۳۲

شکل (۳-۲): نمودار شماتیک UPFC ۳۳

شکل (۳-۳): سیستم ژنراتور متصل به شین بی‌نهایت به همراه UPFC ۳۴

شکل (۳-۴): مدار معادل پسیو π ۳۶

شکل (۴-۱): سیستم SMIB ۵۰

شکل (۴-۲): منحنی زاویه توان رتور ۵۱

شکل (۴-۳): منحنی توان اکتیو ژنراتور ۵۱

شکل (۴-۴): منحنی توان راکتیو ژنراتور ۵۲

شکل (۴-۵): سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بینهایت مورد مطالعه ۵۳
شکل (۴-۶): محاسبه زمان رفع خطای بحرانی ۵۴
شکل (۴-۷): منحنی زاویه رتور ۵۴
شکل (۴-۸): منحنی توان اکتیو ۵۵
شکل (۴-۹): منحنی توان راکتیو ۵۵
شکل (۴-۱۰): منحنی زاویه رتور برای $t_{cl}=0.33$ در حضور UPFC ۵۶
شکل (۴-۱۱): منحنی توان اکتیو برای $t_{cl}=0.33$ در حضور UPFC ۵۷
شکل(۴-۱۲): منحنی توان راکتیو برای $t_{cl}=0.33$ در حضور UPFC ۵۷
شکل (۴-۱۳): منحنی زاویه رتور برای خطای سه فاز self-clearing روی باس ژنراتور ۵۷
شکل (۴-۱۴): منحنی انحراف سرعت رتور برای خطای سه فاز self-clearing روی باس ژنراتور ۵۸
شکل (۴-۱۵): منحنی مسیر متغیرهای حالت سیستم برای خطای سه فاز self-clearing روی باس ژنراتور ۵۸
شکل (۴-۱۶): منحنی توان اکتیو برای خطای سه فاز self-clearing روی باس ژنراتور ۵۹
شکل (۴-۱۷): منحنی توان راکتیو برای خطای سه فاز self-clearing روی باس ژنراتور ۵۹
شکل (۴-۱۸): منحنی تابع انرژی برای خطای سه فاز self-clearing روی باس ژنراتور ۶۰
شکل (۴-۱۹): منحنی زاویه رتور برای خطای سه فاز line-outage روی باس ژنراتور ۶۱
شکل (۴-۲۰): منحنی انحراف سرعت برای خطای سه فاز line-outage روی باس ژنراتور ۶۱
شکل (۴-۲۱): منحنی مسیر متغیرهای حالت سیستم برای خطای سه فاز line-outage روی باس ژنراتور ۶۲
شکل (۴-۲۲): منحنی توان اکتیو برای خطای سه فاز line-outage روی باس ژنراتور ۶۲
شکل (۴-۲۳): منحنی توان راکتیو برای خطای سه فاز line-outage روی باس ژنراتور ۶۳
شکل (۴-۲۴): منحنی تابع انرژی برای خطای سه فاز line-outage روی باس ژنراتور ۶۳
شکل (۴-۲۵): منحنی زاویه رتور برای خطای سه فاز self-clearing وسط یکی از خطوط ۶۴
شکل (۴-۲۶): منحنی توان اکتیو برای خطای سه فاز self-clearing وسط یکی از خطوط ۶۴
شکل (۴-۲۷): منحنی توان راکتیو برای خطای سه فاز self-clearing وسط یکی از خطوط ۶۵
شکل (۴-۲۸): منحنی تابع انرژی برای خطای سه فاز self-clearing وسط یکی از خطوط ۶۵
شکل (۴-۲۹): منحنی زاویه رتور برای خطای سه فاز line-outage وسط یکی از خطوط ۶۶

شکل (۴-۳۰): منحنی توان اکتیو برای خطای سه فاز line-outage وسط یکی از خطوط ۶۶
شکل (۴-۳۱): منحنی توان راکتیو برای خطای سه فاز line-outage وسط یکی از خطوط ۶۷
شکل (۴-۳۲): منحنی تابع انرژی برای خطای سه فاز line-outage وسط یکی از خطوط ۶۷
شکل (۴-۳۳): منحنی زاویه رتور برای افزایش ۵ درصدی توان مکانیکی ۶۸
شکل (۴-۳۴): منحنی انحراف سرعت برای افزایش ۵ درصدی توان مکانیکی ۶۸
شکل (۴-۳۵): منحنی مسیر متغیرهای حالت سیستم برای افزایش ۵ درصدی توان مکانیکی ۶۹
شکل (۴-۳۶): منحنی توان اکتیو برای افزایش ۵ درصدی توان مکانیکی ۶۹
شکل (۴-۳۷): منحنی توان راکتیو برای افزایش ۵ درصدی توان مکانیکی ۷۰
شکل (۴-۳۸): منحنی زاویه رتور ۷۰
شکل (۴-۳۹): منحنی مسیر متغرهای حالت سیستم ۷۱
شکل (۴-۴۰): منحنی زاویه رتور ۷۱
شکل (۴-۴۱): منحنی مسیر متغرهای حالت سیستم ۷۲
شکل (۵-۱): انواع توپولوژی روش اجتماع پرندگان ۷۵
شکل (۵-۲): فلوچارت روش اجتماع پرندگان ۸۱
شکل (۵-۳): منحنی تابع هدف برای شرایط نامی ۸۴
شکل (۵-۴): منحنی زاویه رتور به ازای بهره‌های بهینه در شرایط نامی ۸۴
شکل (۵-۵): منحنی توان اکتیو ژنراتور به ازای بهره‌های بهینه در شرایط نامی ۸۵
شکل (۵-۶): منحنی توان راکتیو ژنراتور به ازای بهره‌های بهینه در شرایط نامی ۸۵
شکل (۵-۷): منحنی مسیر متغیرهای حالت سیستم ۸۶
شکل (۵-۸): منحنی تابع هدف برای نقطه کار تصادفی ۸۷
شکل (۵-۹): منحنی زاویه رتور برای نقطه کار تصادفی ۸۷
شکل (۵-۱۰): منحنی توان اکتیو برای نقطه کار تصادفی ۸۸
شکل (۵-۱۱): منحنی توان راکتیو برای نقطه کار تصادفی ۸۸
شکل (۵-۱۲): منحنی مسیر متغیرهای حالت سیستم برای نقطه کار تصادفی ۸۹

فهرست جدول‌ها

جدول (۵-۱): نتایج **شبیه** سازی برای شرایط نامی سیستم..... ۸۳

جدول (۵-۲): نتایج **شبیه** سازی برای یک نقطه کار تصادفی..... ۸۶

چکیده

افزایش میرایی نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت با استفاده از کنترل محلی UPFC

محمدعلی هادی

امروزه سیستم‌های قدرت به دلیل افزایش بارگذاری و همچنین مسائل اقتصادی و زیست محیطی، در نزدیکی حد پایداری خود مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. برای استفاده کامل از ظرفیت یک سیستم قدرت، لازم است تمهیداتی جهت مقابله با اختلالات احتمالی در نظر گرفته شود تا سیستم قادر به حفظ پایداری خود باشد. میرایی ضعیف نوسانات توان یکی از مهمترین عواملی است که امنیت سیستم‌های قدرت را به مخاطره می‌اندازد.

پایداری گذرا بستگی به عدم تعادل بین توان مکانیکی ورودی به ژنراتورها و توان الکتریکی خروجی آنها دارد و می‌توان پایداری گذرای یک سیستم قدرت را با استفاده از ادوات FACTS و با تغییر منحنی توان-زاویه رتور ژنراتورها در دوره گذرا، بهبود بخشید. در این پایان نامه، ابتدا با استفاده از روش تابع انرژی و با در نظر گرفتن یک مدل غیر خطی برای سیستم‌های قدرت، یک روش کنترلی مبتنی بر متغیرهای حالت سیستم برای UPFC که یکی از ادوات نسل جدید FACTS به حساب می‌آید، استخراج می شود. سپس به منظور پیاده سازی روش کنترلی مبتنی بر کنترل متغیرهای حالت سیستم، از اندازه گیری‌های محلی سیستم شامل توان اکتیو و راکتیو جاری در خطوط انتقال استفاده می‌شود. اما در روش کنترلی مبتنی بر اندازه گیری‌های محلی، لازم است مقادیر عددی مناسبی برای ضرایب بهره کنترل کننده UPFC، انتخاب شود. در واقع تنها با انتخاب درست مقادیر عددی مناسب برای این کنترل کننده، پایداری سیستم تضمین خواهد شد. بنابراین در این پایان نامه از الگوریتم بهینه سازی اجتماع پرندگان (PSO) برای یافتن ضرایب بهینه بهره کنترل کننده UPFC استفاده می‌شود. درستی روش‌های کنترلی ارائه شده در این پایان نامه با انجام شبیه سازی‌های متعدد در یک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بینهایت (SMIB) و تحت شرایط متفاوت خطا مورد، تائید شده است.

کلید واژه: نوسانات فرکانس پایین، ادوات FACTS، کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)، روش مستقیم لیاپانوف، الگوریتم اجتماع پرندگان (PSO).

چکیده انگلیسی

Abstract

Enhancing power system low frequency oscillations damping using a decentralized control scheme of UPFC

M Ali. Hadi

Nowadays, due to the increased loading as well as economical and environmental issues, power systems are being operated near their stability limits. In order to make full use of the capacity of a power system, measures should be taken to maintain system stability in the event of credible contingences (disturbances). Weakly damped power oscillations are one of the main problems endangering the security of a power system.
Transient stability of a power system depends on the imbalance between the mechanical input power and electrical output power of the generators, and it is possible to enhance system transient stability by properly changing the power-angle curve of the generators in the transient period, using the FACTS devices.
In this thesis, first by employing the system state variables and by using the concept of energy function method, a control strategy for UPFC, which is one of the newly developed FACTS devices, is extracted to improve damping for nonlinear models of power systems. Then, in order to implement the aforementioned state variable-based control strategy, a control method based on the system local measurements, including active and reactive power passing through transmission lines, is derived. However, in the local measurement-based control method, we are required to select appropriate numerical values for the gains of the UPFC controller. In fact, only by selecting appropriate numerical values for those gains, the system stability is ensured. Therefore, the particle swarm optimization (PSO) algorithm has been employed in this thesis, to calculate the optimum values for the gains of the UPFC controller. The proposed methods have been successfully applied to a single-machine-infinite-bus (SMIB) test system with different system disturbances, and the simulation results obtained are given.

Key words: Low Frequency Oscillations (LFO), Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Unified Power Flow Controller (UPDC), Direct Lyapanov method, Particle Swarm Optimization (PSO).

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروزه سیستم‌های قدرت[1] به دلیل افزایش بارگذاری و همچنین مسائل اقتصادی و زیست محیطی، در نزدیکی حد پایداری خود مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. برای استفاده کامل از ظرفیت یک سیستم قدرت، لازم است تمهیداتی جهت مقابله با اختلالات[2] احتمالی در نظر گرفته شود تا سیستم قادر به حفظ پایداری خود باشد. مطالعات پایداری گذرا[3] مربوط به تعیین حفظ همگامی[4] بین ماشین‌های سنکرون در شرایطی است که ماشین در معرض یک اختلال شدید قرار گیرد. این اختلال ممکن است اعمال ناگهانی بار، از دست رفتن تولید، از مدار خارج شدن یک بار بزرگ یا رخداد خطا[5] در سیستم باشد. در بسیاری از اختلالات، نوسانات دارای چنان اندازه‌ای هستند که خطی سازی معادلات سیستم قابل قبول نیست و باید سیستم را به صورت غیرخطی در نظر گرفت.

میرایی ضعیف نوسانات توان یکی از مهمترین موانعی است که امنیت سیستم‌های قدرت را به مخاطره می‌اندازد. با طراحی و بهره برداری مناسب از یک سیستم قدرت می‌توان پایداری آن را بهبود بخشید. ویژگی‌های زیر می‌توانند به بهبود پایداری کمک نمایند:

الف) استفاده از تجهیزات حفاظتی و مدارشکن‌هایی که در سریع‌ترین زمان ممکن خطا را برطرف نمایند؛

ب) پرهیز کردن از ایجاد خطوط انتقال بلند و پربار؛

پ) تضمین ذخیره مناسب در ظرفیت انتقال؛

ت) پرهیز از بهره برداری سیستم در فرکانس کم و یا در ولتاژ پایین؛

ث) پرهیز از ضعیف کردن شبکه ناشی از خروج همزمان تعداد زیادی از خطوط و ترانسفورماتورها؛

ج) استفاده از عناصر اضافی از قبیل پایدارساز سیستم قدرت[6] و یا یک سیستم انتقال انعطاف پذیر[7]، که برای کمک به بهبود پاسخ دینامیکی در سیستم قرار داده می‌شوند.

به طور کلی، PSS گشتاور میرا کننده[8] را با تاثیر بر سیستم تحریک ژنراتور افزایش می‌دهد، در حالیکه عناصر FACTS میرایی را با تعدیل[9] مشخصات زاویه توان معادل سیستم بهبود می‌بخشند [۱].

تلاش‌های تحقیقاتی عمده‌ای به طراحی سیستم PSS اختصاص پیدا کرده است. مشکلات اصلی طراحی سیستم‌های PSS مرسوم عبارتند از [۲]:

---

[1] Power Systems
[2] Disturbance
[3] Transient Stability
[4] Synchronism
[5] Fault
[6] **P**ower **S**ystem **S**tabiliser (PSS)
[7] **F**lexible **AC** **T**ransmission **S**ystem (FACTS)
[8] Damping Torque
[9] Modulating

۱- تنظیمات بهینه اغلب وابسته به پارامترهای سیستم قدرت و شرایط بارگذاری است؛
۲- طراحی PSS به طوری که به صورت موثر نوسانات حالت‌های محلی و درون ناحیه‌ای را میرا کند، دشوار است؛
۳- سیستم‌های PSS منحصر به فرد اغلب موجب تاثیرات متقابل مضر در سیستم‌های چند ماشینه می‌شوند.

اغلب روش‌های مطرح شده بر مبنای استفاده از سیستم‌های تطبیق پذیر [۳]، ابزارهای هوش مصنوعی [۴و۵]، تکنیک‌های کنترلی توانمند [۶]، کنترل خطی شده با فیدبک سیستم تحریک [۷] و کنترل کننده‌های چند حلقه‌ای [۸] می‌باشند.

امروزه تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از ادوات FACTS برای بهبود مشخصه‌های حالت ماندگار[1] سیستم‌های قدرت شامل تنظیم ولتاژ و همچنین افزایش ظرفیت انتقال توان در سیستم انجام می‌شود [۹و۱۰]. ولی از آنجاییکه این عناصر دارای سرعت پاسخ بالایی هستند، از آنها می‌توان برای بهبود رفتار گذرا و دینامیک سیستم‌های قدرت نیز بهره برد.

نصب کنترل کننده یکپارچه توان[2] در سیستم قدرت باعث افزایش قابل توجه انتقال توان و بهبود پایداری گذرا و کنترل دینامیک سیستم‌های قدرت جهت عملکرد مطمئن سیستم گردیده است. UPFC به طور مستقل توان اکتیو و راکتیو را در خط انتقال به منظور اعمال گشتاور میراکننده اضافی در سیستم، تزریق و نوسانات ولتاژ را متعادل می‌نماید. در این پایان نامه روش کنترلی بر اساس متغیرهای حالت برای میراسازی نوسانات توان توسط UPFC ارائه شده است.

مزیت اصلی روش کنترلی بر اساس متغیرهای حالت، میراسازی نوسانات بدون نیاز به خطی سازی معادلات سیستم حول نقطه کار می‌باشد. مشکل روش کنترل بر اساس متغیرهای حالت، نیازمندی به تخمین تمام متغیرهای حالت (زاویه رتور و انحراف سرعت تمام ژنراتورها) در سیستم‌های قدرت بزرگ است. این امر یک مشکل بسیار پیچیده است که نیازمند دستگاه‌های اندازه گیری با قابلیت اعتماد بسیار بالا و خطوط پیام رسان می‌باشد. برای اجتناب از این مشکلات، یک روش کنترل محلی بدست آمده است که متغیرهای حالت را به خوبی تخمین می‌زند. برای این منظور از اندازه گیری‌های محلی سیستم شامل توان جاری در خطوط انتقال استفاده شده است.

در این پایان نامه، ابتدا با استفاده از روش تابع انرژی[3] و با در نظر گرفتن یک مدل غیر خطی برای سیستم‌های قدرت، یک روش کنترلی برای UPFC که یکی از ادوات FACTS نسل جدید به حساب می‌آید، به منظور تولید حداکثر میرایی نوسانات فرکانس پایین[4] در سیستم‌های قدرت استخراج می‌شود، که مبتنی بر متغیرهای حالت است. نتیجه این روش کنترلی، میرایی غیر وابسته به نقطه کار می‌باشد که مزیت اصلی روش بدست آمده است. سپس به منظور پیاده کردن روش کنترلی مذکور، از اندازه گیری‌های محلی سیستم شامل توان اکتیو و راکتیو جاری در خطوط انتقال، جهت تخمین متغیرهای حالت، استفاده شده است.

[1] Steady-State
[2] **U**nified **P**ower **F**low **C**ontroller (UPFC)
[3] Energy Function Method
[4] **L**ow **F**requency **O**scillation (LFO)

۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده

اولین تریستور[1]، که در اوایل دهه ۱۹۷۰ ایجاد شد، یکسو ساز کنترل شده سیلیکونی[2] است که فقط توانایی روشن شدن با فرمان را دارد. از SCR در ساختن اولین نوع از ادوات FACTS استفاده شد. پس از آن با ساخته شدن GTO[3]، ادوات FACTS پیشرفته که بر اساس مبدل منبع ولتاژ[4] هستند، ایجاد شدند [۱]. در مرجع [۱۱] عناصر FACTS و کاربردشان در سیستم قدرت شرح داده شده است. مشکل مدلسازی ادوات FACTS در [۱۲و۱۳] پوشش داده شده است.

مفهوم UPFC در سال ۱۹۹۱ توسط L. Gyugyi معرفی گردید [۱۴] که برای کنترل زمان-حقیقی[5] و جبران سازی دینامیکی سیستم انتقال AC به منظور ایجاد انعطاف پذیری با چندین کاربرد بنا نهاده شد. اولین UPFC در جهان با مقدار نامی ۳۲۰MVA در سال ۱۹۹۸ در پست اینز در ایالت کنتاکی آمریکا راه اندازی شد [۱۵].

از نقطه نظر دینامیک سیستم قدرت، مشکل عمده چگونگی کنترل ادوات FACTS و به خصوص UPFC می‌باشد. برای مثال یک راه حل به کار بردن روش کنترل بهینه استاندارد است که در [۱۵-۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است. مشکل روش کنترل بهینه استاندارد، استفاده از مدل خطی شده سیستم قدرت است که فقط برای یک نقطه کار خاص معتبر می‌باشد. حال سوال اینجاست که آیا با تغییر نقطه کار و یا تغییر توپولوژی سیستم (به دلیل خروج یک ژنراتور یا خط)، روش کنترلی ارائه شده همچنان معتبر خواهد بود، در حالیکه سیستم‌های قدرت با رفتارهای غیرخطی شناخته می‌شوند. استفاده از یک روش کنترلی مناسب، امکان میرایی موثر نوسانات توان را فراهم می‌کند [۱۹]. هدف ما در این پایان نامه استخراج روشی است که مبتنی بر مدل غیرخطی سیستم باشد. برای رسیدن به این هدف از روش مستقیم لیاپانوف[6] [۲۰-۲۴] استفاده شده است.

اولین بار روش مستقیم لیاپانوف برای طراحی کنترل کننده پایداری ، در اوایل دهه ۱۹۹۰ با فرض مدل غیرخطی برای کنترل عناصر FACTS از قبیل جبران ساز استاتیکی وار[7] و ذخیره ساز مغناطیسی ابررسانا[8] مورد استفاده قرار گرفته شده است [۲۵و۲۶]. پس از آن، این روش فرمول بندی شده [۱] و برای سایر ادوات FACTS از قبیل مقاومت ترمزی[9] [۲۷]، جبران سازهای سری[10] [۲۸و۲۹]، جبران سازهای سری-موازی [۳۰] و همچنین PSS [۲-۳و۳۱] مورد استفاده قرار گرفته شده است.

۱-۳- ساختار پایان نامه

این پایان نامه به شش فصل تقسیم شده و مطالب، به ترتیب زیر ارائه خواهد شد.

---

[1] Thyristor
[2] **S**ilicon-**C**ontrolled **R**ectifier (SCR)
[3] **G**ate **T**urn-**O**ff Thyristor (GTO)
[4] **V**oltage **S**ource **C**onverter (VSC)
[5] Real-Time
[6] Direct Lyapunov Method
[7] **S**tatic **V**ar **C**ompensator (SVC)
[8] **S**uperconducting **M**agnetic **E**nergy **S**torage (SMES)
[9] Braking Resistor
[10] Series Static Compensator

فصل دوم به بررسی پایداری سیستم‌های قدرت، بدست آوردن معادلات نوسان سیستم و آشنایی با روش‌های بهبود میرایی سیستم اختصاص پیدا کرده است.

فصل سوم با معرفی UPFC و ارائه مدلی برای آن شروع و در نهایت با محاسبه روابط حاکم بر سیستم قدرت در حضور UPFC پایان می‌پذیرد.

در فصل چهارم، روش تابع انرژی، معرفی شده و با استفاده از آن و نیز روابط حاصل شده از فصل سوم، یک روش کنترلی بر اساس متغیرهای حالت استخراج می‌شود. در نهایت برای پرهیز از مشکلات روش ارائه شده، روش کنترلی جدیدی مبتنی بر اندازه گیری‌های محلی بدست آمده است. در پایان فصل نتایج شبیه سازی کامپیوتری برای توجیه روش‌های کنترلی مذکور، ارائه شده‌اند.

در فصل پنجم به معرفی روش بهینه سازی با استفاده از الگوریتم اجتماع پرندگان پرداخته‌ایم. در ادامه با استفاده از این روش ضرایب بهره کنترل کننده را بهینه سازی نموده‌ایم.

فصل ششم به برشمردن نتایج حاصل از این پژوهش و پیشنهاداتی برای ادامه کار اختصاص یافته است.

در انتها نیز مراجعی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، معرفی می‌شوند.

فصل دوم

پایداری سیستم‌های قدرت