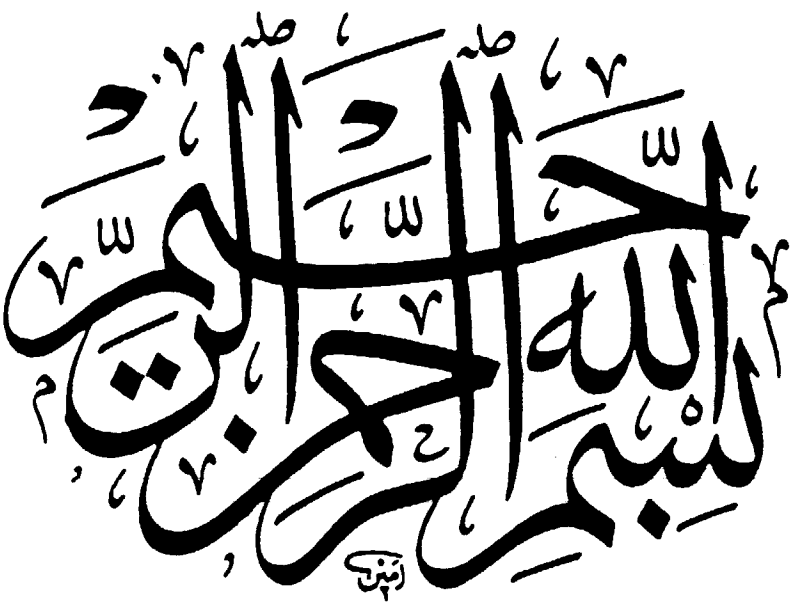

٣٤٥٤٤

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
۱۰ /۱۲/ ۱۳۷۹

به نام خدا

دانشکده مهندسی برق

مطالعه تاثیر کنترل‌کننده یکپارچه توان (UPFC) بر بهبود پایداری گذرای سیستمهای قدرت

علی حسامی نقشبندی

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد

در رشته

مهندسی برق - قدرت

011782

استاد راهنما :

مهندس احد کاظمی

مهرماه ۱۳۷۹

۳۴۵۴۴

تقدیم به مادر عزیزم که سالهاست

بار سنگین زندگی را مردانه بر دوش می‌کشد.

چکیده

در این پروژه ابتدا کنترل‌کننده یکپارچه توان شامل: ساختمان، اصول کار، معادلات ریاضی حاکم و کنترل آن معرفی می‌شود؛ سپس در راستای مطالعهٔ تأثیر کنترل‌کننده یکپارچه توان بر پایداری‌گذرای سیستم قدرت، سه روش کنترلی آن به نامهای کنترل ولتاژ هم فاز، کنترل ولتاژ عمود و جبرانسازی موازی کنترل شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. آنگاه به کمک شبیه‌سازی حوزهٔ زمان تأثیر و توانایی هریک از روشهای کنترلی فوق بر افزایش حاشیه پایداری گذرا و کاهش نوسان گذرا روی سیستم قدرت نمونه بررسی و بر مبنای معیار سطوح برابر نتایجی ملموس در مورد افزایش سطح حاشیه پایداری گذرا ناشی از اعمال روشهای کنترلی سه‌گانه ارائه می‌گردند. به عنوان رهیافتی دیگر تأثیر هریک از روشهای کنترلی فوق بر پایداری گذرای سیستم قدرت مورد مطالعه، نیز بر مبنای روش تابع انرژی گذرا تحلیل و بررسی می‌شود. در این خصوص تأثیر اعمال هریک از این استراتژیهای کنترلی بر پروفیلهای انرژی پتانسیل سیستم و جایگاه نقاط تعادل ناپایدار آن بررسی و نتایج ارائه می‌گردند.

ضمن مقایسهٔ نتایج حاصل از بررسیهای پایداری گذرا به هر دو روش شبیه‌سازی حوزهٔ زمان و تابع انرژی گذرا در نهایت نتیجه‌گیریهای مشابهی در مورد تأثیر هریک از روشهای کنترلی بر بهبود پایداری گذرا بدست می‌آیند، که به نحوی یکدیگر را تائید می‌نمایند.

نتیجه بررسی حاضر در اتخاذ و اعمال استراتژی کنترلی بهینه و هماهنگ جهت بهبود عملکردهای دینامیکی و گذرای سیستم توسط کنترل‌کننده یکپارچه توان می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. به نحوی که ضمن رعایت هماهنگی لازم در مُدهای کاری مختلف از جنبه‌های مفید و محسنات هریک از روشهای کنترلی مذکور حداکثر بهره‌برداری بعمل آید.

تشکر و قدردانی

با سپاس و قدردانی فراوان از جناب آقای مهندس کاظمی استاد ارجمند که از راهنمائیهای خالصانه و گرانبهای ایشان در انجام این تحقیق بهره‌مند شدم و با تشکر از آقایان دکتر جدید و دکتر گلکار که در نشست بررسی این پایان‌نامه شرکت نمودند و با حضور ارزشمندشان به کار اینجانب اعتبار بخشیدند.

بر خود لازم می‌دانم از آقای دکتر سیدعلی نبوی نیاکی از دانشگاه مازندران و آقای دکتر سیدمحمد تقی بطحائی از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بخاطر پیشنهادات ارزنده‌ای که در انجام بهتر پروژه ارائه نمودند سپاسگذاری نمایم. همچنین از آقای دکتر Rafael Mihalic از دانشگاه لیوبلیانا- اسلونی بخاطر رهنمودهای گرانبها و پربارشان و محبت خاصی که در حق اینجانب داشتند نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۱

فصل اول : معرفی کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)

۱-۱ مقدمه ۴

۱-۲ ادوات FACTS کنترل شونده با تایریستور ۴

۱-۲-۱ جبران کننده استاتیک توان راکتیو (SVC) ۵

۱-۲-۲ خازن سری کنترل شونده تایریستوری (TCSC) ۸

۱-۲-۳ تغییر دهنده فاز ۱۰

۱-۳ ادوات FACTS مبتنی بر مبدلهای الکترونیک قدرت ۱۱

۱-۳-۱ مفاهیم اساسی ۱۲

۱-۳-۲ منبع ولتاژ سنکرون متکی بر مبدل سوئیچینگ ۱۵

۱-۳-۳ جبران کننده سنکرون استاتیک (STATCOM) ۱۹

۱-۳-۴ جبران کننده سری سنکرون استاتیک (SSSC) ۲۳

۱-۳-۵ کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC) ۲۶

۱-۳-۵-۱ اصول کنترل توان حقیقی و راکتیو توسط UPFC ۳۲

۱-۴ کنترل UPFC ۳۵

۱-۴-۱ مُدهای کنترلی و عملکرد کاری ۳۸

۱-۴-۱-۱ کنترل عملکرد مبدل موازی ۳۹

۱-۴-۱-۲ کنترل عملکرد مبدل سری ۴۰

۱-۴-۱-۳ جبرانسازی سری و موازی تنها ۴۱

۱-۴-۲ سیستم کنترل پایه برای کنترل P و Q ۴۲

فصل دوم : روشهای مطالعه پایداری گذرای سیستم قدرت

۲-۱ مقدمه ۴۶

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۲-۲ پایداری گذرا، تعریف مساله ۴۸

۲-۳ روشهای مطالعه پایداری گذرا ۴۹

۲-۳-۱ روش شبیه سازی حوزه زمان (TDS) ۵۰

۲-۳-۱-۱ رفتار ژنراتور تحت شرایط گذرا ۵۲

۲-۳-۱-۲ معیار سطوح برابر ۵۶

۲-۳-۲ روش مستقیم تحلیل پایداری گذرا ۵۹

۲-۳-۲-۱ شرحی بر روش تابع انرژی گذرا ۵۹

۲-۳-۲-۲ کاربرد روش TEF در سیستمهای قدرت ۶۴

۲-۳-۳ روش هیبرید در تعین حاشیه پایداری گذرای یک سیستم قدرت ۶۷

فصل سوم : تأثیر UPFC بر بهبود پایداری گذرا

۳-۱ مقدمه ۷۱

۳-۲ جبرانسازی دینامیک برای بهبود پایداری گذرا ۷۱

۳-۳ تحلیل سیستمهای قدرت مجهز به ادوات FACTS ۷۵

۳-۳-۱ مدل سیستم و مشخصه های اساسی انتقال ۷۵

۳-۳-۲ کنترل انتقال توان با استفاده از UPFC ۷۶

۳-۳-۳ کنترل UPFC جهت بهبود پایداری گذرا ۸۱

۳-۴ تحلیل پایداری گذرا و مدل دینامیکی UPFC ۸۶

۳-۴-۱ مدلهای دینامیکی ۸۷

۳-۴-۱-۱ اجزای یک سیستم کنترلی ۸۸

۳-۴-۱-۲ مدل UPFC ۹۰

فصل چهارم : شبیه سازی تأثیر UPFC بر بهبود پایداری گذرا

۴-۱ مقدمه ۹۵

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۴-۲ شبیه سازی حوزه زمان ۹۵

۴-۲-۱ تحلیل نوسان گذرا ۹۷

۴-۳ مطالعه تأثیر UPFC بر پایداری گذرا بکمک روش تابع انرژی گذرا ۱۱۰

فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ خلاصه ۱۱۶

۵-۲ نتایج ۱۱۷

۵-۳ پیشنهادات ۱۱۹

پیوستها

پیوست ۱ : اطلاعات و پارامترهای سیستم مورد مطالعه ۱۲۲

پیوست ۲ : نتایج کامپیوتری شبیه سازی سیستم مورد مطالعه به تفکیک ۱۲۳

فهرست مراجع ۱۴۳

فهرست تصاویر و نمودارها

عنوان **صفحه**

۱-۱ کنترل کننده های FACTS مبتنی بر تایریستورهای معمولی ۵

۱-۲ جبران کننده وار استاتیک تایریستوری متداول ۶

۱-۳ مشخصه ولت - آمپر جبران کننده وار استاتیک ۶

۱-۴ افزایش توان انتقالی قابل حصول با یک SVC ۷

۱-۵ جبرانسازی سری قابل کنترل با خازن سری کنترل شونده تایریستوری ۹

۱-۶ مشخصه توان انتقالی در جبرانسازی سری ۱۰

۱-۷ ترانسفورماتور تغیر دهنده فاز کنترل شونده با تایریستور ۱۱

۱-۸ منبع ولتاژ سنکرون مبتنی بر مبدل سوئیچینگ در اتصال موازی ۱۳

۱-۹ خانواده کنترل کننده های FACTS مبتنی بر مبدلهای سوئیچینگ ۱۵

۱-۱۰ مبدل شش پالسه مقدماتی و شکل موجهای ولتاژ خروجی ۱۶

۱-۱۱ ساختار کلی مبدل چند پالسه و شکل موجهای خروجی مبدل ۱۷

۱-۱۲ منبع ولتاژ سنکرون در کار بعنوان یک STATCOM ۱۹

۱-۱۳ مشخصه ولت - آمپر STATCOM ۲۱

۱-۱۴ افزایش توان انتقالی قابل حصول با یک STATCOM ۲۲

۱-۱۵ مقایسه بهبود در پایداری گذرا ناشی از نصب یک SVC و یک STATCOM در وسط خط ۲۲

۱-۱۶ جبرانسازی موسوم خط انتقال بوسیله خازن سری ۲۳

۱-۱۷ منبع ولتاژ سنکرون در کار بعنوان یک SSSC ۲۵

۱-۱۸ توان منتقل شده P برحسب زاویه انتقال δ بعنوان تابعی از ولتاژ جبرانسازی سری SSSC ۲۵

۱-۱۹ مفهوم اساسی کنترل کننده یکپارچه توان ۲۷

۱-۲۰ پیاده سازی UPFC بوسیله دو مبدل منبع ولتاژ پشت به پشت ۲۷

۱-۲۱ قابلیتهای کاری UPFC ۲۹

۱-۲۲ محدوده های توان حقیقی و راکتیو یک خط انتقال کنترل شده بوسیله UPFC ۳۱

فهرست تصاویر و نمودارها

عنوان **صفحه**

۱-۲۳ توان حقیقی قابل انتقال و توان راکتیو درخواستی انتهای خط در یک سیستم دو ماشینه ۳۲

۱-۲۴ نواحی کنترلی توان حقیقی و راکتیو در یک خط انتقال کنترل شده بوسیله UPFC ۳۴

۱-۲۵ طرح کنترل پایه برای UPFC ۳۷

۱-۲۶ ساختار کامل کنترلی UPFC ۳۸

الف -۱-۲۷ بلوک دیاگرام کنترل مبدل سری UPFC ۴۲

ب -۱-۲۷ بلوک دیاگرام کنترل مبدل موازی UPFC برای کار با ولتاژ لینک dc ثابت ۴۳

ج -۱-۲۷ بلوک دیاگرام کنترل مبدل موازی UPFC برای کار با ولتاژ لینک dc متغیر ۴۴

۲-۱ پاسخ زاویه رتور به یک اغتشاش گذرا ۴۸

۲-۲ سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت و مشخصه انتقال مربوطه ۵۷

۲-۳ نمایش پایداری گذرا ۵۹

۲-۴ نمایش توپ غلتان بر روی سطح داخلی یک کاسه ۶۰

۲-۵ نمایش معادل بودن روش انرژی گذرا و معیار سطوح مساوی ۶۲

۲-۶ ناحیه پایدار و تقریب محلی ۶۳

۳-۱ نمایش معیار سطوح برابر برای پایداری گذرا ۷۱

۳-۲ معیار سطوح برابر جهت نمایش حاشیه پایداری گذرا در حالتهای جبرانسازی مختلف ۷۳

۳-۳ مدل ساده یک سیستم انتقال ۷۶

۳-۴ مدل سیستم انتقال با UPFC و دیاگرامهای فازوری مربوطه ۷۸

۳-۵ مشخصه های انتقال بهینه ۸۰

۳-۶ نمایش استراتژی کلی کنترل UPFC ۸۲

۳-۷ نمایش استراتژی کنترلی UPFC ۸۵

فهرست تصاویر و نمودارها

عنوان **صفحه**

۳-۸ ساختار عمومی کنترل ادوات FACTS ۸۸

۳-۹ مدل مداری UPFC (مدل ایروانی - نبوی نیاکی) ۹۰

۳-۱۰ مدل مداری UPFC (مدل Povh - Mihalic) و نکت اساسی مربوط به مدلسازی ۹۱

۳-۱۱ مدل مداری اصلاح شده UPFC ۹۲

۴-۱ سیستم SMIB مورد مطالعه ۹۶

۴-۲ مدل مداری سیستم SMIB مورد مطالعه مجهز به UPFC ۹۷

الف -۳-۴ مشخصه (منحنی) P-δ در حالت کنترل نشده ۱۰۰

ب -۳-۴ مشخصه (منحنی) P-δ در حالت جبرانسازی موازی کنترل شده ۱۰۱

ج -۳-۴ مشخصه (منحنی) P-δ در حالت کنترل ولتاژ هم فاز ۱۰۲

د -۳-۴ مشخصه (منحنی) P-δ در حالت کنترل ولتاژ قائم ۱۰۳

۴-۴ فایل اصلی مدل Matlab سیستم مورد مطالعه ۱۰۵

۴-۵ منحنی های نوسان گذرا در حالتهای مختلف ۱۰۷

۴-۶ MVA مبدل تزریق در حالت کنترل ولتاژ هم فاز ۱۰۸

۴-۷ MVA مبدل تزریق در حالت کنترل ولتاژ قائم ۱۰۸

۴-۸ MVAR تامین شده بوسیله مبدل تحریک در حالت جبرانسازی موازی کنترل شده ۱۰۹

۴-۹ توان حقیقی عبوری از مبدل تحریک در حالت کنترل ولتاژ هم فاز ۱۰۹

۴-۱۰ توان حقیقی عبوری از مبدل تحریک در حالت کنترل ولتاژ قائم ۱۱۰

۴-۱۱ پروفیلهای انرژی پتانسیل در حالتهای مختلف ۱۱۳

۴-۱۲ اثر تاخیر در زمان رفع خطا بر حاشیه پایداری گذرا در حالتهای مختلف ۱۱۴

فهرست تصاویر و نمودارها

عنوان **صفحه**

فایل اصلی مدل Matlab سیستم مورد مطالعه با درنظر گرفتن مدل کلاسیک برای ژنراتور ۱۲٤

فایل اصلی مدل Matlab سیستم مورد مطالعه با درنظر گرفتن مدل مرتبه سوم برای ژنراتور ۱۲۵

منحنی نوسان زاویه رتور برحسب زمان در حالت کنترل نشده ۱۲٦

منحنی نوسان زاویه رتور برحسب زمان در حالت جبرانسازی موازی کنترل شده ۱۲۷

منحنی نوسان زاویه رتور برحسب زمان در حالت کنترل ولتاژ هم فاز ۱۲۸

منحنی نوسان زاویه رتور برحسب زمان در حالت کنترل ولتاژ قائم ۱۲۹

منحنی توان ظاهری (MVA) عبوری از مبدل تزریق در حالت کنترل ولتاژ هم فاز ۱۳۰

منحنی توان ظاهری (MVA) عبوری از مبدل تزریق در حالت کنترل ولتاژ قائم ۱۳۱

منحنی‌توان‌راکتیو (MVAR) تامین‌شده بوسیله‌مبدل‌تحریک‌درحالت‌جبرانسازی‌موازی کنترل‌شده ۱۳۲

منحنی توان حقیقی عبوری از مبدل تحریک در حالت کنترل ولتاژ هم فاز ۱۳۳

منحنی توان حقیقی عبوری از مبدل تحریک در حالت کنترل ولتاژ قائم ۱۳٤

پروفیل انرژی پتانسیل سیستم در حالت کنترل نشده ۱۳۵

پروفیل انرژی پتانسیل سیستم در حالت جبرانسازی موازی کنترل شده ۱۳٦

پروفیل انرژی پتانسیل سیستم در حالت کنترل ولتاژ هم فاز ۱۳۷

پروفیل انرژی پتانسیل سیستم در حالت کنترل ولتاژ قائم ۱۳۸

اثر تأخیر در زمان رفع خطا بر حاشیه پایداری گذرای سیستم در حالت کنترل نشده ۱۳۹

اثر تأخیر در زمان رفع‌خطا برحاشیه پایداری‌گذرای سیستم‌درحالت‌جبرانسازی‌موازی‌کنترل شده ۱٤۰

اثر تأخیر در زمان رفع خطا بر حاشیه پایداری گذرای سیستم در حالت کنترل ولتاژ هم فاز ۱٤۱

اثر تأخیر در زمان رفع خطا بر حاشیه پایداری گذرای سیستم در حالت کنترل ولتاژ قائم ۱٤۲

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۳ : تنظیم پارامترهای‌قابل‌کنترل UPFC جهت‌رسیدن به مشخصه‌های‌انتقال‌حداکثروحداقل ۸۵

جدول ۱-۴ : انرژی گذرای سیستم SMIB در حالتهای مختلف ۱۱۲

جدول پیوست ۱ : اطلاعات و پارامترهای سیستم مورد مطالعه ۱۲۲

مقدمه

در سالهای اخیر صنعت برق با مشکلات بی سابقه ای درخصوص بهای انرژی، مسائل زیست‌محیطی، موضوعات نظارتی و مشکلات ناشی از بحران انرژی روبرو شده است که احداث نیروگاهها و خطوط انتقال جدید را بتعویق انداخته اند. این در حالی است که تقاضای انرژی الکتریکی پیوسته در حال رشد و افزایش می باشد. این وضعیت ایجاب می کند که مفاهیم سنتی و مرسوم بهره برداری از سیستمهای قدرت مورد تجدید نظر و بررسی مجدد قرار گیرند و برای رسیدن به قابلیت بهره برداری بالاتر و حداکثر استفاده از سیستمهای قدرت موجود تلاش شود. در این راستا بدیهی است که مسائل امنیتی سیستم و قابلیت اطمینان آن نیز باید بطور کامل رعایت شوند. خوشبختانه در طول دو دهه گذشته پیشرفتهای زیادی در تکنولوژی ساخت و کنترل قطعات نیمه هادی در قدرتها بالا حاصل شده است. کاربرد وسیع این تکنولوژیها در انتقال جریان مستقیم (HVDC) و ارتباط سیستمهای قدرت بزرگ و همچنین نقش جبران کننده های استاتیک توان راکتیو در بهبود عملکرد سیستمهای انتقال جریان متناوب بر همگان آشکار است. از سویی دیگر بدیهی است که کنترل یک خط انتقال AC بصورت بهنگام تابعی از امپدانس خط، اندازه های ولتاژ ابتدا و انتها و زاویه فاز بین این ولتاژهاست و جبران کننده های استاتیک توان راکتیو تنها یکی از این سه پارامتر مهم را می توانند کنترل نمایند. ولی هنگامی که بارگیری از خطوط انتقال افزایش می یابد و توان عبوری از خطوط تا حد ظرفیتهای حرارتی مجاز آنها بالا برده می شود، مسائل پایداری دینامیک و گذرا بطور جدی مطرح خواهند شد و در مواجهه با اغتشاشها و اختلالات وارده به سیستم به ادواتی نیاز است که ضمن قابلیت کنترل بهنگام و مستقل توانهای اکتیو و راکتیو عبوری از خط، سرعت پاسخ دهی بالایی داشته باشند. بعبارت دیگر تحت چنین شرایطی کنترل کننده هایی مورد نیازند که بتوانند مشخصه های انتقال توان را در کمترین زمان ممکن به بهترین شکل تغییر دهند تا اثرات ناشی از اغتشاش وارده به سیستم قدرت را بنحو مطلوب کنترل و برطرف نمایند [۱].

بدین ترتیب مفهوم سیستمهای انتقال AC انعطاف پذیر[1] (FACTS) که با بهره گیری از ادوات الکترونیک قدرت، قابلیت کنترل توان را بصورت دینامیک داشته باشند، پایه گذاری شد. در همین راستا براساس مفهوم منبع ولتاژ سنکرون[2] (SVS) و بر پایه تلفیق قابلیتهای کنترلی گوناگون این ادوات،

1- Flexible AC Transmission Systems

2- Synchronous Voltage Source

کنترل‌کننده یکپارچه توان[1] (UPFC) طراحی و پیشنهاد شد [۲].

UPFC کلیه قابلیتها و مشخصه های عملیاتی دیگر کنترل کننده های FACTS را بطور مجتمع در خود دارد و بعنوان کنترل کننده ای شناخته می شود که بطور همزمان و مستقل قابلیت کنترل توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال را داراست.

با معرفی UPFC افقهای جدیدی پیش روی مهندسین و طراحان سیستمهای قدرت گشوده شد و امروزه سعی بر آنست تا با بکارگیری معقول این کنترلر چند منظوره بتوان با کیفیت هر چه بالاتر از سیستمهای موجود بهره برداری کرد.

هدف از انجام این پروژه، آشنایی با این کنترلر و بررسی استراتژیهای کنترلی پایهٔ آنست. درواقع هدف، بررسی تأثیر روشهای کنترلی UPFC بر بهبود پایداری گذرا می باشد. تا ضمن درک پتانسیلهای موجود در هر روش از جنبه های مفید هر یک بتوان در اتخاذ استراتژی کنترلی بهینه و هماهنگ استفاده کرد. هدف دیگری که در این مطالعه دنبال می شود آنست که نشان داده شود نتایج حاصله از بررسیهای پایداری گذرا به روش شبیه سازی حوزهٔ زمان و به روش تحلیل تابع انرژی گذرا بنحوی منطقی و نزدیک موید درستی یکدیگرند. در این پروژه، در فصل اول جهت ایجاد زمینه لازم و رعایت پیشنیاز به لحاظ پیوستگی مطالب ابتدا شرحی مختصر بر کنترل کننده های FACTS پایه آورده، سپس به معرفی UPFC، ساختمان، اصول کار و معادلات ریاضی حاکم بر آن پرداخته می شود. در فصل دوم روشهای مطالعه و بررسی پایداری گذرای سیستم قدرت مورد بحث قرار می گیرند و در فصل سوم تأثیر UPFC بر بهبود پایداری گذرای سیستم بررسی می شود. در فصل چهارم به شبیه سازی تأثیر UPFC بر پایداری گذرای سیستم قدرت مورد مطالعه پرداخته می شود و عملاً بهبود مشخصه های سیستم و افزایش حاشیه پایداری گذرای آن بصورت بسیار ملموس و بصری مشاهده می گردد. فصل آخر نیز به جمع بندی و نتیجه گیری بحث اختصاص یافته است.

امید است مطالعه انجام گرفته بعنوان مقدمه ای بر مطالعه تأثیر UPFC در بهبود پایداری گذرای سیستمهای قدرت شناخته شود.

1- Unified Power Flow Controller