دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی برق – قدرت

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی برق – قدرت

کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان و کاربرد آن در خطوط انتقال موازی

نگارش:

مرتضی علیزاده

استاد راهنما:

دکتر محمود عبادیان

اساتید مشاور:

دکتر محسن فرشاد

دکتر رضا شریعتی‌نسب

شهریور ۸۹

چکیده

افزایش تقاضای انرژی الکتریسیته، باعث عملکرد سیستم‌های قدرت در نزدیکی مرزهای پایداری خود می‌شوند. این افزایش تقاضا هم چنین باعث شده اغلب سیستم‌های تأمین نیروی برق در جهان به‌صورت به هم پیوسته به بهره برداری برسند. از طرف دیگر، با رشد میزان انتقال توان، سیستم قدرت به صورت فزاینده‌ای از نظر بهره برداری پیچیده‌تر شده است. این امر ممکن است به سیلان مقادیر زیاد توان، بدون کنترل مناسب، منجر شود؛ توان راکتیو اضافی در بخش‌های مختلف سیستم ایجاد نماید و نوسانات دینامیکی بزرگی بین بخش‌های مختلف سیستم ایجاد کند؛ به صورتی که از همه ظرفیت‌ها و قابلیت‌های شبکه انتقال بهره‌برداری به عمل نیاید. و حتی ممکن است به ناپایداری ولتاژ و در نهایت به فروپاشی ولتاژ منجر شود. در حال حاضر اساسی ترین مسئله در طراحی سیستم قدرت تأمین حداکثر ظرفیت انتقال و همزمان به حداقل رساندن هزینه بهره برداری است. این همان مسئله ایست که باعث شده طراحان سیستم قدرت، بهره برداران و مهندسین، با بهره‌گیری از روش‌های ابتکاری، تجهیزات قدرتمندی را بر پایه الکترونیک قدرت به دنیا معرفی نمایند. " سیستم‌های انتقال انعطاف پذیر AC" یا به اختصار "FACTS" عنوانی است که بر این تجهیزات گذاشته اند. در حال حاضر اصلی‌ترین توانایی ادوات FACTS، جبرانسازی توان راکتیو، کنترل ولتاژ و کنترل سیلان توان است. از میان مرسوم‌ترین ادوات FACTS، کنترل کننده یکپارچه سیلان توان (UPFC) ، که هدف تحقیقاتی این پروژه است، به عنوان یک کنترل‌کننده ترکیبی سری – موازی شناخته شده است. طبق تعریف IEEE/CIGRE ، UPFC ترکیبی از جبران‌ساز سنکرون استاتیکی (STATCOM) و جبران‌ساز سری استاتیکی (SSSC) که از طریق یک رابط dc به هم جفت شده‌اند، تا اجازه سیلان دو سویه توان حقیقی را بین ترمینال‌های خروجی سری SSSC و ترمینال‌های خروجی موازی STATCOM بدهند؛ و کنترل آن‌ها به منظور جبران سازی سری همزمان توان حقیقی و راکتیو خط، بدون منبع خارجی انرژی الکتریکی ، صورت می‌گیرد. UPFC در حقیقت یک کنترل‌کننده کامل برای کنترل توان راکتیو و اکتیو در خط و نیز کنترل ولتاژ خط است. این پایان‌نامه قصد دارد با معرفی این کنترل کننده قدرتمند اصول اساسی عملکرد آن را در سیستم قدرت بررسی کند. مدل UPFC در محاسبات پخش بار و همچنین مدل سیگنال کوچک آن در سیستم قدرت تک ماشینه ارائه خواهد شد. یک کنترل‌کننده بر پایه منطق فازی ارائه می‌گردد. کاربرد UPFC در انتقال توان در خطوط انتقال موازی به کمک مدل فازوری آن نشان داده می‌شود.

کلید واژه: سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر ac، کنترل کننده یکپارچه سیلان توان، پایداری سیگنال کوچک، کنترل فازی، خطوط انتقال موازی

زندگی صحنه یکتای هنرمندی ماست

هر کسی نغمه خود خواند و از صحنه رود

صحنه پیوسته بجاست

خرم آن نغمه که مردم بسپارند بیاد

تقدیم به:

«همسر عزیزم»

که تمامی اوقات مصروف در آماده‌سازی این پروژه به وی تعلق داشت.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می دانم که از زحمات بی دریغ استاد گرامی خود جناب آقای دکتر محمود عبادیان که با راهنمائی های دلسوزانه و خردمندانه خود سمت استاد راهنما را معنایی تازه بخشیدند، کمال تشکر و تقدیر را بنمایم. همچنین از اساتید محترم مشاور خویش جناب آقای دکتر محسن فرشاد و جناب آقای دکتر رضا شریعتی نسب تشکر نموده و برای ایشان آرزوی موفقیت روزافزون می نمایم.

و من الله التوفیق

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ شرح مسئله..... ۲

۱-۲ کنترل‌کننده‌های FACTS ۲

۱-۳ کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان (UPFC)..... ۳

۱-۴ رویکرد پروژه..... ۴

فصل دوم: کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر کنورتورهای سوئیچ‌شونده..... ۶

۲-۱ مقدمه..... ۷

۲-۲ ادوات نیمه‌هادی دارای دریچه قطع با توان بالا..... ۷

۲-۳ اصول کار یک مبدل منبع ولتاژ (VSC) ۱۰

۲-۳-۱ ساختار مداری یک مبدل منبع ولتاژی..... ۱۰

۲-۳-۲ اصول عملکرد و روابط پایه..... ۱۲

۲-۴ کنورتورهای منبع ولتاژ و کاربردهای FACTS..... ۲۰

۲-۴-۱ جبرانساز استاتیکی سنکرون موازی (STATCOM)..... ۲۰

۲-۴-۲ جبرانساز استاتیکی سنکرون سری (SSSC) ۲۵

۲-۵ کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان..... ۲۹

۲-۵-۱ ساختار UPFC ۲۹

۲-۵-۲ اصول عملکرد UPFC..... ۳۰

۲-۵-۳ کنترل یکپارچه به کمک UPFC..... ۳۱

۲-۵-۴ سیستم قدرت مجهز شده به UPFC..... ۳۳

۲-۵-۵ کنترل سیلان توان توسط UPFC..... ۳۵

فصل سوم: مدل پخش بار کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان..... ۴۲

۳-۱ مقدمه..... ۴۳

۳-۲ مدل حالت دائمی UPFC..... ۴۳

۳-۳ معادلات پخش توان UPFC ۴۴

۳-۴ برنامه پخش بار ۴۶

۳-۵ سیستم قدرت دو ناحیه‌ای..... ۴۷

۳-۶ تحلیل نتایج برنامه پخش بار..... ۴۸

۳-۶-۱ نتایج عددی..... ۴۸

۳-۶-۲ منحنی‌ها..... ۵۲

فصل چهارم: تحلیل پایداری سیگنال کوچک UPFC..... ۵۶

۴-۱مقدمه..... ۵۷

۴-۲ مدل سیگنال‌کوچک سیستم قدرت مجهز به UPFC..... ۵۸

۴-۲-۱ مدل ریاضی UPFC..... ۵۸

۴-۲-۲ مدل ساده شده UPFC در سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت..... ۶۱

۴-۲-۳ خطی‌سازی مدل سیگنال کوچک UPFC..... ۶۳

۴-۲-۴ معادلات ژنراتور و اکسایتر..... ۶۶

۴-۳ تحلیل پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت تک‌ماشینه..... ۷۰

۴-۳-۱ ماتریس A و مقادیر ویژه سیستم..... ۷۰

۴-۳-۲ مدل Phillips-Heffron اصلاح شده..... ۷۱

۴-۳-۳ بررسی پایداری مدل اصلاح شده بدون حضور جبرانساز..... ۷۲

۴-۳-۴ طراحی یک کنترل‌کننده به‌منظور پایداری سیستم..... ۷۶

۴-۳-۵ ارزیابی کنترل‌کننده طراحی شده..... ۷۸

۴-۴ مقدمه‌ای بر کنترل فازی ۸۰
۴-۵ طراحی کنترل‌کننده فازی ۸۱
۴-۵-۱ توابع عضویت ۸۱
۴-۵-۲ پایگاه قواعد فازی ۸۱
۴-۵-۳ غیرفازی‌ساز ۸۲
۴-۵-۴ ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده فازی و مقایسه آن با کنترل‌کننده‌های کلاسیک ۸۳
فصل پنجم: کنترل سیلان توان در خطوط انتقال موازی ۸۶
۵-۱ مقدمه ۸۷
۵-۲ کنترل UPFC ۸۸
۵-۳ کنترل مبدل موازی ۸۹
۵-۴ کنترل مبدل سری ۹۱
۵-۵ توصیف سیستم قدرت دو ناحیه‌ای ۹۲
۵-۶ سیلان توان قبل از نصب UPFC ۹۳
۵-۷ سیلان توان پس از نصب UPFC ۹۳
۵-۷-۱ نتایج شبیه‌سازی رویکرد اول ۹۴
۵-۷-۲ بررسی پایداری ژنراتورها در لحظه عملکرد UPFC ۹۷
۵-۷-۳ نتایج شبیه‌سازی رویکرد دوم ۹۹
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۴
مراجع ۱۰۸
ضمائم ۱۱۱

فهرست جدول‌ها

جدول (۲-۱): تبادل توان بین STATCOM و سیستم ac ۲۴

جدول (۳-۱): ولتاژ و زاویه باس‌ها در حضور و عدم حضور UPFC ۴۹

جدول (۳-۲): تولید توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها در حضور و عدم حضور UPFC..... ۴۹

جدول (۳-۳): سیلان توان و تلفات بدون حضور UPFC..... ۵۰

جدول (۳-۴): سیلان توان و تلفات با حضور UPFC..... ۵۱

جدول (۳-۵): اختلاف توان مبدل‌های سری و موازی ۵۱

جدول (۳-۶): مقادیر منابع مبدل‌های سری و موازی در طول پروسه تکرار ۵۲

جدول (۴-۱): بهره و زاویه فاز تابع تبدیل H(s) ۷۸

جدول (۴-۲): پارامترهای کنترل‌کننده‌های UPFC ۷۹

جدول (۴-۳): پایگاه قواعد فازی کنترل‌کننده فازی ۸۲

فهرست شکل‌ها

شکل (۲-۱): ساختار یک کنورتور متداول سه‌فاز دوسطحی ۱۱

شکل (۲-۲): توالی کلیدزنی برای هدایت ۱۸۰ درجه ۱۳

شکل (۲-۳): شکل موج‌های خروجی کنورتور یه‌فاز شبیه‌سازی شده ۱۵

شکل (۲-۴): ولتاژهای ترمینال کنورتور سه‌فاز شبیه‌سازی شده ۱۷

شکل (۲-۵): تحلیل هارمونیکی ولتاژهای کنورتور ۱۸

شکل (۲-۶): سیلان توان اکتیو متوسط برای زوایای آتش مختلف ۱۹

شکل (۲-۷): سیلان توان راکتیو متوسط برای زوایای آتش مختلف ۲۰

شکل (۲-۸): دیاگرام تک‌خطی یک STATCOM ۲۲

شکل (۲-۹): نمایش برداری عملکرد STATCOM ۲۳

شکل (۲-۱۰): دیاگرام تک‌خطی یک SSSC ۲۶

شکل (۲-۱۱): جبرانسازی سری توسط SSSC ۲۷

شکل (۲-۱۲): مدار اساسی یک کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان ۲۹

شکل (۲-۱۳): دیاگرام‌های فازوری ۳۲

شکل (۲-۱۴): سیستم قدرت دو ماشینه مجهز شده به UPFC ۳۳

شکل (۲-۱۵): رابطه فازوری منبع ولتاژ سری و جریان خط در عملکرد جبرانسازی سری ۳۴

شکل (۲-۱۶): رابطه فازوری ولتاژ باس M و ولتاژ سری V_{se} در عملکرد جابجا کننده فاز ۳۵

شکل (۲-۱۷): سیستم قدرت دو ماشینه ۳۵

شکل (۲-۱۸): مکان هندسی $P\text{-}Q_o$ برای سیستم قدرت جبرانسازی نشده ۳۶

شکل (۲-۱۹): کنترل توان به کمک UPFC ۳۷

شکل (۲-۲۰): تغییرات توان در سیستم مجهز شده به UPFC ۳۸

شکل (۲-۲۱): توان اکتیو و راکتیو تأمین شده توسط UPFC ۳۹
شکل (۲-۲۲): محدوده کنترل توان اکتیو و راکتیو در یک خط انتقال کنترل‌شده توسط UPFC ۴۱
شکل(۳-۱): (الف) سیستم قدرت با UPFC (ب) مدل پخش بار UPFC ۴۳
شکل (۳-۲): مدار معادل کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان ۴۴
شکل (۳-۳): سیستم قدرت دو ناحیه‌ای شامل UPFC ۴۸
شکل (۳-۴): سیلان توان اکتیو در خط ۸ با ولتاژ ثابت V_{cR}=0.3227 pu ۵۳
شکل (۳-۵): سیلان توان اکتیو در خط ۸ با زاویه فاز ثابت θ_{cR}=-119.7518 deg ۵۳
شکل (۳-۶): محدوده کنترل توان اکتیو و راکتیو توسط UPFC در خط ۸ ..... ۵۳
شکل (۳-۷): سیلان توان اکتیو در خط مجهز به UPFC (زاویه فاز ثابت) ۵۴
شکل (۳-۸): سیلان توان اکتیو در خط مجهز به UPFC (دامنه ولتاژ ثابت) ۵۴
شکل(۳-۹): سیلان توان اکتیو در خط مجهز شده به UPFC ۵۵
شکل(۴-۱): مدار معادل سه‌فاز UPFC ۶۱
شکل(۴-۲): UPFC نصب شده در سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت ۶۲
شکل(۴-۳): مدل خطی سیستم قدرت تک‌ماشینه مجهز به UPFC متصل به شین بی‌نهایت ۷۳
شکل(۴-۴): بلوک دیاگرام ساده شده بدون حضور جبران‌کننده ۷۴
شکل(۴-۵): پاسخ زمانی فرکانس زاویه‌ای رتور نسبت به ورودی پله Δm_E ۷۵
شکل(۴-۶): پاسخ $\Delta\omega$ به ورودی پله $\Delta\delta_E$ ۷۵
شکل(۴-۷): پاسخ $\Delta\omega$ به ورودی پله Δm_B ۷۶
شکل(۴-۸): پاسخ $\Delta\omega$ به ورودی پله $\Delta\delta_B$ ۷۶
شکل(۴-۹): ساختار کنترل‌کننده برای پایداری سیستم ۷۷
شکل (۴-۱۰): پاسخ $\Delta\omega$ به چهار کنترل‌کننده طراحی شده ۷۹
شکل (۴-۱۱): ساختار اصلی سیستم‌های فازی با فازی‌ساز و غیر فازی‌ساز ۸۰
شکل (۴-۱۲): توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی ۸۱

شکل (۴-۱۳): ساختار کنترل‌کننده فازی ۸۲
شکل (۴-۱۴): پاسخ $\Delta\omega$ با کنترل‌کننده فازی ۸۳
شکل (۴-۱۵): پاسخ P_M با کنترل‌کننده فازی..... ۸۴
شکل (۴-۱۶): مقایسه کنترل‌کننده فازی با کنترل‌کننده‌های کلاسیک (پاسخ $\Delta\omega$) ۸۴
شکل (۴-۱۷): مقایسه کنترل‌کننده فازی با کنترل‌کننده‌های کلاسیک (پاسخ P_M) ۸۵
شکل (۵-۱): سیستم کنترل مبدل موازی ۹۰
شکل (۵-۲): ساختار داخلی کنترل‌کننده جریان ۹۱
شکل (۵-۳): سیستم کنترل مبدل سری ۹۲
شکل (۵-۴): سیستم قدرت دو ناحیه‌ای شامل UPFC ۹۳
شکل (۵-۵): توان اکتیو مرجع و توان اکتیو انتقالی توسط UPFC ۹۴
شکل (۵-۶): توان راکتیو مرجع و توان راکتیو انتقالی توسط UPFC ۹۵
شکل (۵-۷): ولتاژ باس ۸ بر حسب pu ۹۵
شکل (۵-۸): ولتاژ خازن dc ۹۶
شکل (۵-۹): توان اکتیو انتقالی از خطوط موازی بر حسب MW ۹۶
شکل (۵-۱۰): توان اکتیو انتقالی از خطوط موازی بر حسب MVar..... ۹۷
شکل (۵-۱۱): سرعت زاویه‌ای رتور ژنراتورها بر حسب pu ۹۸
شکل (۵-۱۲): توان الکتریکی تولیدی ژنراتورها بر حسب pu ۹۸
شکل (۵-۱۳): ولتاژ ترمینال ژنراتورها بر حسب pu ۹۹
شکل (۵-۱۴): ولتاژ تحریک ژنراتورها بر حسب pu..... ۹۹
شکل (۵-۱۵): توان اکتیو مرجع و توان اکتیو انتقالی توسط UPFC ۱۰۰
شکل (۵-۱۶): توان راکتیو مرجع و توان راکتیو انتقالی توسط UPFC ۱۰۰
شکل (۵-۱۷): ولتاژ خازن dc ۱۰۰
شکل (۵-۱۸): ولتاژ باس ۸ بر حسب pu ۱۰۱

شکل (۵-۱۹): توان اکتیو انتقالی از خطوط (۱) و (۲) بر حسب MW ۱۰۱
شکل (۵-۲۰): توان راکتیو انتقالی از خطوط (۱) و (۲) بر حسب MVar ۱۰۲
شکل (۵-۲۱): سرعت زاویه‌ای رتور ژنراتورها بر حسب pu ۱۰۲
شکل (۵-۲۲): توان الکتریکی ژنراتورها بر حسب pu ۱۰۲
شکل (۵-۲۳): ولتاژ ترمینال ژنراتورها بر حسب pu ۱۰۳
شکل (۵-۲۴): ولتاژ تحریک ژنراتورها بر حسب pu ۱۰۳

فصل اول

مقدمه

۱-۱ شرح مسئله

در سال های اخیر مسائل اقتصادی و افزایش بار تحمیلی به شبکه های انتقال، مهندسین و بهره برداران را بر آن داشته است که تا حد امکان حداکثر توان الکتریکی را از یک خط انتقال معین منتقل نمایند. این رشد میزان انتقال توان، سیستم قدرت را از نظر بهره برداری پیچیده کرده است. بهره برداری خطوط انتقال در نزدیکی مرزهای پایداری خود، افزایش وابستگی مراکز عمده بار به تولید مستمر و علاوه بر این محدودیت نصب خطوط انتقال جدید به علت وسیع تر شدن حریم شهرها، از جمله مشکلات عدیده ایست که بهره برداران سیستم های قدرت در ازای رشد میزان انتقال توان با آن مواجه هستند.

با این وجود انتقال توان از دیرباز به عنوان یکی از مسائل مهم بهره‌برداران سیستم‌های قدرت مورد توجه ویژه بوده است. چراکه وقتی صحبت از انتقال توان می‌شود، به بسیاری از سؤالات بر می‌خوریم. از جمله اینکه، ظرفیت خطوط انتقال چقدر است و آیا خطوط انتقال توانایی انتقال توان مورد نظر را دارند یا خیر؟ واحدهای تولیدی ما توانایی تولید دارند یا خیر؟ اگر ظرفیت انتقال به حد نهایی رسیده باشد که باید خطوط جدید احداث کرد و اگر تولید به حداکثر خود رسیده باشد که باید ظرفیت تولید را افزایش داد، و این یعنی احداث واحدهای نیروگاهی جدید. این دو راه‌حل با بزرگتر شدن سیستم‌های قدرت و توسعه حریم شهرها و همچنین کمبود منابع سوختی به بن‌بست می‌رسند! لذا باید به دنبال راه‌کار جدیدتر و البته مقرون به‌صرفه از نظر اقتصادی باشیم. البته لازم به ذکر است که در بسیاری از ضرورت‌های افزایش ظرفیت شبکه، احداث خطوط جدید یا واحدهای جدید ضرورت دارد.

۱-۲ کنترل‌کننده‌های FACTS

افزایش ظرفیت توان انتقالی خطوط به حدی که نتوان کنترل مناسبی روی آن‌ها داشته باشیم بسیار مسئله خطرناکی است. عدم کنترل توان در خطوط انتقال ممکن است منجر به نوسانات دینامیکی شدیدی در سیستم قدرت و همچنین ژنراتورها شود و حتی در برخی موارد منجر به ناپایداری ولتاژ و در نهایت فروپاشی ولتاژ می‌شود. بنابراین افزایش ظرفیت خطوط انتقال همان مسئله‌ایست که باعث شده طراحان سیستم قدرت، بهره برداران و مهندسین، به بهره گیری از روش های ابتکاری، تجهیزات قدرتمندی را بر پایه الکترونیک قدرت به دنیا معرفی نمایند. " سیستم های انتقال انعطاف پذیر AC"[۱] یا به اختصار "FACTS" عنوانی است که بر

۱- Flexible AC Transmission Systems

این تجهیزات گذاشته‌اند. کنترل‌کننده‌های FACTS می‌توانند با تأمین انعطاف‌پذیری اضافی، یک خط انتقال را قادر به منتقل نمودن توان تا نزدیکی حد حرارتی آن بنمایند. کنترل سیلان توان، افزایش ظرفیت قابل بهره‌برداری خطوط موجود و همچنین خطوط جدید و ارتقاء یافته از جمله قابلیت‌های FACTS است که با کنترل پارامترهایی از قبیل امپدانس سری، امپدانس موازی، جریان، ولتاژ، زاویه فاز و میرایی نوسانات انجام می‌دهد. کنترل‌کننده‌های FACTS به‌صورت سری، موازی یا ترکیب سری- موازی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. نمونه سری یک کنترل‌کننده FACTS می‌تواند یک امپدانس متغیر باشد، مثل خازن یا راکتور. ماهیت همه کنترل‌کننده‌های سری یکسان است به‌طوریکه این دسته از کنترل‌کننده‌ها ولتاژ را به‌صورت سری به خط منتقل می‌کنند. اگر ولتاژ خط بر جریان عمود باشد، کنترل‌کننده سری فقط توان راکتیو تولید یا مصرف می‌کند. هر اختلاف فاز دیگری، موجب تبادل توان اکتیو نیز با خط می‌گردد [۱].

کنترل‌کننده‌های موازی نیز همانند نمونه سری آن‌ها، می‌تواند یک امپدانس متغیر یا منبع متغیر باشد. همه انواع کنترل‌کننده‌های موازی در محل اتصال خود جریان به خط تزریق می‌کنند. در این حالت نیز اگر جریان بر ولتاژ خط عمود باشد، فقط توان راکتیو به خط تزریق یا جذب می‌شود و هر زاویه فاز دیگری منجر به تبادل توان اکتیو نیز می‌شود.

کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری-موازی می‌توانند به‌صورت یکپارچه جریان را با بخش موازی کنترل‌کننده و ولتاژ سری شده با خط را با بخش سری کنترل‌کننده، به سیستم تزریق نمایند. لفظ یکپارچه برای این نوع کنترل‌کننده‌ها به این خاطر است که امکان تبادل توان اکتیو نیز از طریق یک رابط dc که معمولاً یک خازن یا یک منبع ولتاژ dc یا یک مبدل است، وجود دارد.

۱-۳ کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان (UPFC)

کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان[۱] (UPFC) که یکی از قدرتمندترین ادوات FACTS است، و موضوع پروژه حاضر می‌باشد، از دسته کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری-موازی است. از دیدگاه انتقال توان سنتی، UPFC قادر به کنترل همزمان یا انتخابی تمام پارامترهای مؤثر بر سیلان توان در خط انتقال، یعنی: ولتاژ، امپدانس و زاویه فاز، است. علاوه بر آن می‌تواند به‌طور مستقل سیلان توان اکتیو و راکتیو را در خط کنترل نماید. طبق تعریف IEEE/CIGRE ، UPFC ترکیبی از جبران ساز سنکرون استاتیکی[۲] (STATCOM) و جبران ساز سری

۱- Unified Power Flow Controller

۲- Static Synchronous Compensator

استاتیکی[۱] (SSSC) که از طریق یک رابط dc به هم جفت شده اند، تا اجازه سیلان دو سویه توان حقیقی را بین ترمینال های خروجی سری SSSC و ترمینال های خروجی موازی STATCOM بدهند؛ و کنترل آن ها به منظور جبران سازی سری همزمان توان حقیقی و راکتیو خط، بدون منبع خارجی انرژی الکتریکی ، صورت می گیرد [۱، ۲، ۳].

کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان از جمله کنترل‌کننده‌هایی است که اساس آن را کنورتورهای سوئیچ‌شونده از نوع منبع ولتاژی تشکیل می‌دهند. کنترل سیلان توان مهمترین وظیفه و البته مزیت استفاده از UPFC در سیستم‌های قدرت است. این وسیله قادر است با تنظیم مناسب سیلان توان در خطوط انتقال، از اضافه بار یک پست یا یک خط جلوگیری نماید.

۱-۴ رویکرد پروژه

این پروژه نحوه عملکرد کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان را در سیستم‌های قدرت و کاربرد آن در خطوط انتقال موازی بررسی می‌کند. اجزاء سازنده اصلی این کنترل‌کننده قدرتمند را معرفی و تشریح کرده و اصول کار UPFC را با جزئیات کامل به‌منظور درک عمیقتر مزیت‌های استفاده از این کنترل‌کننده، بیان نماید. نحوه مدلسازی این کنترل‌کننده در حالت‌های دائمی و دینامیکی را مورد بررسی قرار داده و نتایج استفاده از آن را تحلیل نماید. یک مدل جامع از UPFC استخراج کرده به‌طوریکه برای تحلیل پایداری سیستم‌های قدرت اعم از گذرا و سیگنال کوچک مناسب باشد. همچنین این پروژه نحوه کنترل توان، به‌ویژه در خطوط انتقال موازی، را به کمک شبیه سازی، بررسی می‌کند. یک روش کنترلی مبتنی بر منطق فازی برای سیستم قدرت تک‌ماشینه مجهز به UPFC ارائه می‌شود و با کنترل‌کننده سنتی مقایسه می‌گردد. کاربرد UPFC را در خطوط انتقال موازی و نحوه کنترل سیلان توان را تشریح کرده و پایداری ژنراتورهای سیستم قدرت دو ناحیه‌ای را در لحظه عملکرد UPFC مورد بررسی قرار دهد.

در فصل دوم ابتدا اصول و مفاهیم کنورتورهای سوئیچ‌شونده از نوع منبع ولتاژی که اساس کار کنترل‌کننده‌های ترکیبی سری- موازی هستند تشریح می‌گردد. در این فصل با شبیه‌سازی یک مبدل ۶ پالسه عملکرد آن‌ها تشریح می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی روابط حاکم بر این مبدل‌ها را تأیید می‌کنند. سپس دو کنترل‌کننده معروف، STATCOM و SSSC، که اجزاء سازنده UPFC هستند معرفی می‌گردد. مفاهیم و نحوه عملکرد این دو کنترل‌کننده را به‌تنهایی در سیستم قدرت تشریح می‌گردد تا درک عملکرد UPFC آسانتر شود. در ادامه به

۱- Static Synchronous Series Compensator

معرفی کنترل‌کننده یکپارچه سیلان توان پرداخته شده است و عملکرد آن در سیستم‌های قدرت بیان می‌شود. ضرورت استفاده از این کنترل‌کننده را در سیستم‌های قدرت با استفاده از معادلات آن تشریح کرده و جزئیات چگونگی کنترل توان و محدوده کنترل توان توسط UPFC بیان می‌گردد.

در فصل سوم پس از استخراج معادلات توان UPFC برنامه پخش بار سیستم قدرت دو ناحیه‌ای را نوشته و نتایج آن با نتایج عدم حضور UPFC مقایسه می‌شود. نتایج برنامه به‌خوبی نشان‌دهنده مزیت استفاده از UPFC را در سیستم قدرت مذکور نشان می‌دهد. تأثیر UPFC کاهش تلفات و آزادسازی ظرفیت خطوط انتقال به‌خوبی نشان داده شده است. پس از بررسی نتایج عددی منحنی‌های بدست آمده از معادلات UPFC را بررسی شده است. منحنی‌های بدست آمده کاملاً نتایج عددی پخش بار را تأیید می‌کنند.

در فصل چهارم پس از استخراج مدل ریاضی کاربرد آن در سیستم قدرت تک‌ماشینه بررسی شده است. لذا معادلات حالت (خطی شده) سیستم قدرت تک‌ماشینه مجهز به UPFC را بدست آورده و به کمک آن‌ها مدل معروف Phillips-Heffron استخراج شده است. سپس به بررسی پایداری این مدل تحت یک اغتشاش کوچک پرداخته شده است. با تحلیل مقادیر ویژه مشخص شد سیستم مذکور ناپایدار بوده، لذا به‌منظور پایداری آن چهار کنترل‌کننده از نوع جبران‌کننده پسفاز/پیشفاز برای چهار پارامتر کنترلی UPFC پیشنهاد شده است. به‌منظور پایداری بیشتر سیستم قدرت مذکور یک کنترل‌کننده فازی طراحی شده است و نتایج آن را با کنترل‌کننده سنتی مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی برتری کنترل‌کننده فازی را بر کنترل‌کننده سنتی نشان می‌دهد.

فصل پنجم پروژه به کنترل سیلان توان در خطوط انتقال موازی اختصاص دارد. در این فصل به معرفی کنترل‌کننده‌های PI برای مبدل‌های سری و موازی UPFC پرداخته شده است. مدل فازوری UPFC را در سیستم قدرت دو ناحیه‌ای قرار داده و نحوه کنترل سیلان توان را در خطوط موازی این سیستم قدرت نشان داده شده است. ضرایب کنترل‌کننده‌ها و پارامترهای UPFC به‌نحوی تنظیم شده‌اند که کمترین نوسان و در نتیجه بیشترین میرایی را در پی داشته باشد. همچنین به بررسی پایداری ژنراتورهای موجود در سیستم قدرت دو ناحیه‌ای پرداخته شده است.

در پایان در فصل ششم به جمع‌بندی مطالب و نتیجه‌گیری پرداخته شده است. همچنین پیشنهاداتی در راستای این پروژه برای کارهای آینده ارائه شده است.

فصل دوم

کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر کنورتورهای سوئیچ‌شونده

۲-۱ مقدمه

کنورتورهای منبع ولتاژی اساس کار کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر کنورتورهای سوئیچ شونده را تشکیل می‌دهند. لذا در این فصل ابتدا به معرفی قطعات نیمه‌هادی دارای قابلیت قطع و وصل (که به آنها دستگاه‌های قطع گفته می‌شود) پرداخته شده است. در ادامه ساختار مبدل‌های منبع ولتاژی و مدار آنها معرفی شده است. اصول عملکرد و روابط حاکم بر آنها نشان داده شده است و ثابت می‌شود که با کنترل مناسب ولتاژ dc ورودی یا تنظیم زاویه هدایت قطعات نیمه‌هادی می‌توان به ولتاژ خروجی متغیر دست یافت. کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر کنورتورهای منبع ولتاژی، STATCOM و SSSC، معرفی می‌شوند. این دو کنترل‌کننده دو بخش مهم ساختمان UPFC به‌شمار می‌روند. لذا قبل از تشریح عملکرد UPFC بهتر است با ساختمان و اصول عملکرد آن‌ها آشنا شویم.

در ادامه به معرفی مدار UPFC بر اساس کنورتورهای منبع ولتاژی پرداخته شده است. نشان داده شده که اتصال پشت به پشت دو کنوتور منبع ولتاژ قابلیت‌های منحصر به فردی در زمینه کنترل همزمان زاویه فاز، ولتاژ خط و سیلان توان در سیستم قدرت ایجاد می‌کند. معادلات UPFC و نحوه سیلان توان توسط UPFC بیان شده است.

۲-۲ ادوات نیمه‌هادی دارای کلید قطع با توان بالا

مبدل‌های مرسوم دارای کنترل وصل بوده و قطع آن بستگی به صفر شدن جریان در مدار و شرایط سیستم دارد. سوئیچ‌های دارای قابلیت قطع و وصل قطعات گرانتری هستند و تلفات بیشتری نسبت به تریستورهای فاقد قابلیت قطع دارند. اما در عین حال دارای مزیت‌هایی هستند که در هزینه کلی سیستم و عملکرد آن امتیازات مهمی ایجاد می‌کند. این مزیت‌ها بیشتر از کنورتور با کموتاسیون خودی ناشی می‌شوند. باید یادآوری کرد که دو مقوله اصلی در مورد مبدل‌های با کموتاسیون خودی بسته به نوع منبع ورودیشان در طرف dc مطرح است [۱]:

۱- کنوتورهای منبع ولتاژی[۱] (VSC): ورودی ترمینال dc یک منبع ولتاژ (به عنوان مثال یک خازن) است و جریان عبوری از آن می‌تواند مثبت یا منفی باشد. به عبارت دیگر، منبع ولتاژ dc در این کنورتور همواره دارای یک پلاریته است در حالیکه جهت جریان آن میتواند عکس شود. لذا جهت سیلان توان اکتیو می‌تواند متناسب با تغییر جهت جریان، بین ترمینال dc و ac مبدل تغییر کند.

۱-Voltage Source Convertor