بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشکده فنی و مهندسی**

**پایان نامه کارشناسی ارشد**

**مهندسی برق- قدرت**

عنوان پایان نامه:

# طراحی کنترلر جبرانساز توان راکتیو ایستا ( SVC ) بر مبنای کنترل مد لغزشی( SMC ) به منظور کاهش ترنزینت غیرنرمال

استاد راهنما :

**دکتر مهرداد رستمی**

استاد مشاور :

**دکتر محمد توکلی بینا**

نگارش :

**بابک صادقی**

پاییز ۱۳۹۱

هوالحکیم

شکر و سپاس خدا را که بزرگترین امید و یاور در لحظه لحظه زندگیست.

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. ستایش خدای را جل و جلاله، که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید؛ و سلام و دورد بر حضرت محمّد(ص) و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

تقدیم به

پیوند دهنده فرشیان خاک و عرشیان افلاک، برافرازنده پرچم پیروزی و رستگاری و سربلندی، معناکننده عدالت و صلابت و فروزنده مشعل هدایت، حضرت بقیّة الله الأعظم صاحب الزّمان (عجل الله تعالی فرجه الشّریف)

تقدیم به

پدر و مادر دلسوز و مهربانم، که نه میتوانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای پینه بسته شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. آنان که ناتوان شدند تا به توانایی برسم و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجودم و روشنگر مسیرم باشند و دعای خیرشان را همواره بدرقه راهم ساختند و با صبر و شکیبایی خود در تمام دوران زندگی امید موفقیت را در وجودم زنده نگه داشتند. پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

# تقدیر و تشکر

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.
اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ":
از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر رستمی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛ و از استاد صبور و با تقوا، جناب آقای دکتر توکلی بینا، که زحمت مشاوره این پایان نامه را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این خرد ترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

همچنین از دوستانم عزیزم: دکتر محمد مهریان، حمیدرضا عرب شیرازی، دکتر محمد رحیمیان و میثم بخشی هتکه لویی یاسی، مهندس سعید شیرزاد و دکتر امین حکمت منش که در مراحل مختلف انجام پایان نامه، باعث دلگرمی بنده بودند، کمال تشکر و سپاس را دارم.

خداوندا به ما توفیق تلاش در شکست، صبر در نومیدی، رفتن بی همراه، جهاد بی سلاح، کار بی پاداش، فداکاری در سکوت، دین بی دنیا، مذهب بی عوام، عظمت بی نام، خدمت بی نان، ایمان بی ریا، خوبی بی نمود، گستاخی بی خامی، مناعت بی غرور، عشق بی هوس، تنهایی در انبوه جمعیت و دوست داشتن بی آنکه دوست بدارند، را عنایت فرما.

## چکیده

در این پایان نامه به منظور کاهش ولتاژ گذرای شبکه و بهبود تنظیم ولتاژ سیستم، یک کنترل کننده غیر خطی برای جبرانساز توان راکتیو ایستا[1] (SVC) معرفی می‌شود. از مدل فضای حالت درجه سه جبرانساز توان راکتیو ایستا برای طراحی کنترلر استفاده می‌شود. عدم قطعیت در مدل سیستم های غیر خطی از نامعینی پارامترهای سیستم یا دینامیک های مدل نشده ناشی می شود؛ در واقع عدم قطعیت در مدل کردن سیستم اثر بسیار نامطلوبی در طراحی و عملکرد سیستم کنترلی خواهد داشت و به دو دسته عدم قطعیت ساختاری (پارامتری) و غیر ساختاری(دینامیک های مدل نشده سیستم) تقسیم می‌شوند. روش کنترل مد لغزشی[2](SMC) برای کنترل جبرانساز توان راکتیو ایستا با وجود نامعینی های ثابت و متغیر با زمان در شبکه، پاسخ بسیار مطلوب و مقاومی از خود نشان می‌دهد. به منظور کنترل جبرانساز توان راکتیو ایستا، یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر[3](PID) نیز طراحی می‌شود، سپس نتایج حاصل برای هر دو نوع کنترل کننده های خطی و غیر خطی مقایسه می‌شوند. برای تحقق این هدف یک سیستم قدرت نمونه را در نظر می‌گیریم و با استفاده از شبیه سازی در محیط نرم افزار متلب این دو نوع کنترل کننده پیاده سازی و نتایج مقایسه می‌شوند. نتایج حاصل از شبیه سازی در شرایط یکسان، برتری کنترل مد لغزشی در برابر کنترل تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر را، هنگام عملکرد جبرانساز راکتیو ایستا در شبکه قدرت نشان می‌دهد. در شرایط یکسان برای هر دو کنترل کننده، هر سه متغیر حالت جبرانساز راکتیو ایستا، یعنی جریان ترانس متصل کننده آن به شبکه، جریان راکتور و ولتاژ خازن، با هم مقایسه شده اند. همچنین مباحث مربوط به نمای لیاپانف و بستر جذب برای سیستم جبران ساز توان راکتیو ایستا مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده می شود که از نظر تحلیلی با توجه به نمای لیاپانف و مشخصات دینامیکی سیستم، بستر جذب از نوع سیکل حدی[4] خواهد بود. نتایج حاصل از شبیه سازی کامپیوتری نیز بستر جذب از نوع سیکل حدی را نمایان می‌کند.



**واژه‌های کلیدی:**

ادوات FACTS[5]، جبرانساز توان راکتیو ایستا، راکتور کنترل شده با تریستور، کنترل مد لغزشی، صفحه سوئیچینگ، چترینگ[6] (زیگزاگ)، کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر، سیکل حدی


[1] Static Var Compensator
[2] Sliding mode Control
[3] Proportional Integral Derivative
[4] Limit Cycle
[5] Flexible Ac Transmission System
[6] Chattering

# فهرست مطالب


**فصل ۱- مقدمه ..... ۱**

**فصل ۲- کنترل توان راکتیو ..... ۳**

۲-۱- اهمیت کنترل توان راکتیو ..... ۴

۲-۲- نیازمندیهای اساسی در انتقال توان ac ..... ۴

۲-۳- ادوات FACTS ..... ۶

۲-۴- قابلیتها و امکاناتFACTS ..... ۷

۲-۵- محدودیتهای ظرفیت بارگذاری ..... ۸

۲-۵-۱- محدودیتهای حرارتی ..... ۹

۲-۵-۲- محدودیت دی الکتریک ..... ۹

۲-۵-۳- محدودیت پایداری ..... ۱۰

۲-۶- انواع کنترل کننده‌هایFACTS ..... ۱۰

۲-۶-۱- کنترل کننده‌های سری ..... ۱۱

۲-۶-۲- کنترل کننده‌های موازی ..... ۱۱

۲-۶-۳- کنترلر ترکیبی سری-سری ..... ۱۱

۲-۶-۴- کنترلر ترکیبی سری-موازی ..... ۱۱

۲-۷- جبرا نسازهای موازی ساکن ..... ۱۲

۲-۸- جبرانساز توان راکتیو ایستا (SVC) ..... ۱۲

۲-۹- جبران ساز استاتیک ( STATCOM ) ..... ۱۵

۲-۱۰- راکتور کنترل شونده با تریستور (TCR) ..... ۱۶

۲-۱۱- مدل فضای حالت جبرانساز توان راکتیو ایستا ..... ۲۰

**فصل ۳- طراحی کنترلرها ..... ۲۴**

۳-۱- کنترل مد لغزشی ..... ۲۴

۳-۱-۱- مقدمهای بر کنترل مد لغزشی ..... ۲۴
۳-۱-۲- صفحه سوئیچینگ یا سطوح لغزشی ..... ۲۶
۳-۱-۳- مزایا ومعایب کنترل مد لغزشی ..... ۳۲
۳-۱-۴- معرفی پدیده زیگزاگ ..... ۳۳
۳-۲- مقایسه کنترل غیرخطی لغزشی با کنترل خطی تناسبی- انتگرالی-مشتق گیر ..... ۳۴
**فصل ۴- ساختار سیستم های کنترل SVC ..... ۳۶**
۴-۱- سیستم های کنترل کلاسیک SVC ..... ۳۷
۴-۱-۱- سیستم کنترل حلقه باز ..... ۳۷
۴-۱-۲- سیستم کنترل حلقه بسته ..... ۳۸
۴-۱-۳- ترکیب کنترل مدار باز و بسته ..... ۴۰
۴-۲- طراحی کنترل‌کننده غیرخطی مد لغزشی برای SVC ..... ۴۱
۴-۲-۱- یافتن سیگنال کنترل ..... ۴۱
۴-۲-۲- تغییرات در سیگنال خروجی کنترل قبل از اعمال آن به تریستورها ..... ۴۴
**فصل ۵- سیکل حدی به عنوان بستر جذب برای سیستم SVC ..... ۴۶**
۵-۱- نقاط ثابت در سه بعد ..... ۴۶
۵-۲- مقاطع پوانکاره ..... ۵۱
۵-۳- انواع بستر جذب و نمای لیاپانف ..... ۵۱
**فصل ۶- شبیه سازی کامپیوتری SVC ..... ۵۵**
**فصل ۷- نتیجه گیری و پیشنهاد ..... ۷۵**
۷-۱- نتیجه گیری ..... ۷۵
۷-۲- پیشنهادات ..... ۷۶
**واژه نامه** فارسی به انگلیسی **..... ۸۰**

## فهرست شکل‌ها


شکل ۲-۱ : ساختار یک SVC شامل یک TCR و سه TSC ..... ۱۴
شکل ۲-۲ : راکتور کنترل شونده توسط تریستور ( Thyristor Controlled Reactor ) TCR ..... ۱۶
شکل ۲-۳: تغییرات جریان راکتور کنترل شونده توسط تریستور بر حسب زاویه آتش ..... ۱۹
شکل ۲-۴: مشخصه کنترل سوسپتانس TCR ..... ۱۹
شکل ۲-۵: مدل پایه SVC از نوع TSC-TCR ..... ۲۱
شکل ۲-۶ : دیاگرام تک فاز TCR ..... ۲۱
شکل ۲-۷: عملکرد ایده آل یک TCR ( Vc , Ir ) ..... ۲۲
شکل ۳-۱: شرح گرافیکی حرکت بر روی سطح لغزشی برای $n=2$ ..... ۲۹
شکل ۳-۲ :پدیده زیگزاگ بعنوان یک نتیجه از سوئیچینگهای کنترلی ناقص ..... ۳۳
شکل ۴-۱: سیستم کنترل مدار باز SVC ..... ۳۷
شکل ۴-۲: نحوه عملکرد کنترل کننده حلقه بسته ..... ۳۸
شکل ۴-۳: نحوه عملکرد کنترل کننده با حلقه داخلی (رگولاتور جریان) ..... ۳۹
شکل ۴-۴: ترکیب کنترل مدار باز و بسته ..... ۴۰
شکل ۵-۱: نمایش نقاط ثابت در فضای حالت سه بعدی به همراه مقادیر ویژه ی نقاط ثابت در صفحه ی مختلط ..... ۴۹
شکل ۵-۲: مقطع پوانکاره برای فضای حالت سه بعدی ..... ۵۱
شکل ۵-۳: شکل توروس از یک مقطع عرضی ..... ۵۳
شکل ۶-۱: شبیه سازی سیستم با SVC در محیط سیمولینک متلب با استفاده از زیر سیستم ..... ۵۶
شکل ۶-۲: شبیه سازی سیستم با SVC در محیط سیمولینک متلب بدون استفاده از زیر سیستم ..... ۵۷
شکل ۶-۳: منبع ولتاژ متناوب متغیر ..... ۵۸
شکل ۶-۴: جریان ترانسفورماتور $i_s$ با کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر ..... ۵۹
شکل ۶-۵: جریان ترانسفورماتور $i_s$ با کنترلر مد لغزشی ..... ۵۹
شکل ۶-۶: ولتاژ خازن $V_c$ با کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر ..... ۶۰
شکل ۶-۷: ولتاژ خازن $V_c$ با کنترلر مد لغزشی ..... ۶۰
شکل ۶-۸: جریان راکتور $i_t$ با کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر ..... ۶۱
شکل ۶-۹: جریان راکتور $i_t$ با کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر با جزئیات بیشتر ..... ۶۱

شکل ۶-۱۰: جریان راکتور $i_t$ با کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر به هنگام افزایش ولتاژ (خطا) ..... ۶۲
شکل ۶-۱۱: جریان راکتور $i_t$ با کنترلر مد لغزشی ..... ۶۲
شکل ۶-۱۲ : پالس های آتش تریستور T1 به هنگام افزایش ولتاژ منبع..... ۶۳
شکل ۶-۱۳: پالس های آتش تریستور T1 به هنگام کاهش ولتاژ منبع ..... ۶۴
شکل ۶-۱۴جریان تریستور T1 ..... ۶۴
شکل ۶-۱۵: جریان تریستور T1 به هنگام افزایش ولتاژ منبع..... ۶۵
شکل ۶-۱۶: جریان تریستور T1 به هنگام کاهش ولتاژ منبع ..... ۶۵
شکل ۶-۱۷: ولتاژ تریستور T1..... ۶۶
شکل ۶-۱۸: ولتاژ تریستور T1 به هنگام افزایش ولتاژ منبع ..... ۶۶
شکل ۶-۱۹: ولتاژ تریستور T1 به هنگام کاهش ولتاژ منبع ..... ۶۷
شکل ۶-۲۰: خطای ولتاژ RMS دو سر خازن..... ۶۸
شکل ۶-۲۱: صفحه سوئیچینگ یا سطح لغزش ..... ۶۸
شکل ۶-۲۲: علامت صفحه سوئیچینگ ..... ۶۹
شکل ۶-۲۳: علامت صفحه سوئیچینگ به هنگام افزایش ولتاژ منبع ..... ۶۹
شکل ۶-۲۴: تبدیل FFT متغیر اول حالت X1 (جریان ترانسفورماتور $i_s$) ..... ۷۰
شکل ۶-۲۵: تبدیل FFT متغیر دوم حالت X2 (ولتاژ خازن Vc) ..... ۷۱
شکل ۶-۲۶: تبدیل FFT متغیر سوم حالت X1 (جریان it ,TCR ) ..... ۷۱
شکل ۶-۲۷: نمودار فضای حالت سه بعدی متغیرهای X1 و X2 وX3 با جاذب سیکل حدی ..... ۷۳
شکل ۶-۲۸: مسیر حالت متغیرهای X1 و X2 ..... ۷۳
شکل ۶-۲۹: مسیر حالت متغیرهای X1 و X3 ..... ۷۴
شکل ۶-۳۰: مسیر حالت متغیرهای X2 و X3 ..... ۷۴

## فهرست جدول‌ها

جدول ۱ . پارامترهای شبیه سازی ..... ۵۴

# فصل ۱– مقدمه

در گذشته مشکلاتی از قبیل تغییرات ولتاژ به هنگام تغییر بار و همچنین محدودیت های انتقال توان درسیستم های قدرت مشاهده می شد، که یک راه حل مفید و کاربردی برای حل این مشکلات، جبرانساز توان راکتیو است. امروزه نیز این مباحث به شکل پیشرفته تر در قابلیت اطمینان شبکه های گسترده مطرح می شود. ادوات سریع الکترونیک قدرت مثل تریستورها[۷]، که در جبرانسازهای توان راکتیو به کار برده می شوند، نقش بسیار مهمی در کاهش محدودیت های انتقال انرژی ایفا می کنند. با نصب جبرانساز توان راکتیو ایستا در یک باس می توان دامنه ولتاژهای گذرا و نا مطلوب را کاهش داد که این مهم با استفاده از حلقه های کنترلی که معمولاً از نوع پس-پیشفاز هستند تحقق می یابد [۱]. طراحی این حلقه های کنترلی بر اساس مدل های خطی شده صورت می گیرد که معمولاً برای یک رنج عملکردی خاص معتبر هستند.

نتایج [۲] نشان می دهد که طراحی یک کنترلر پس-پیشفاز به هنگام تغییرات بار ممکن است موجب ناپایداری سیستم شود. حتی ممکن است با استفاده از اندازه گیری های محلی، چندین کنترل کننده پس-پیشفاز نیز طراحی شود [۳و۴]. این اندازه گیری ها می توانند سیگنال هایی از قبیل سرعت ژنراتور یا اختلاف سرعت بین دو ناحیه مختلف باشند[۵و۶].

برخی روش های کنترل غیر خطی نیز پیشنهاد شده اند[۷]. تنظیم این نوع کنترل کننده از لحاظ محاسبات ریاضی بسیار مشکل و پیچیده است چون سیگنال های غیر خطی ولتاژ و جریان ممکن است هارمونیک هایی ایجاد کنند که باعث به هم خوردن تنظیمات کنترل کننده شوند. یک روش دیگر بر مبنای خطی سازی برای طراحی کنترلر غیر خطی برای جبرانساز توان راکتیو ایستا به کار می رود[۸].

[7] Thyristors

اهداف این پایان نامه در سه بخش دسته بندی می شوند:

- ✓ طراحی یک کنترل کننده غیر خطی برای جبرانساز توان راکتیو ایستا بر مبنای کنترل مد لغزشی
- ✓ مقایسه عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده PID در سیستم یکسان ولی تحت بارهای مختلف
- ✓ بررسی بستر جذب سیستم با جبرانساز توان راکتیو از دید تئوری و تایید نتایج با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری

به دلیل هزینه های بالای ساخت خطوط انتقال جدید، سیستم های قدرت امروزه بسیار نزدیک به محدوده پایداری خود عمل می کنند و در عین حال نیازها و بارهای شبکه در حال افزایش هستند. در نتیجه شبکه قدرت به سمت تنش پیش می رود و ناپایداری یک تهدید بسیار مهم از دید امنیت و قابلیت اطمینان به حساب می آید. وقتی یک سیستم به نقطه فروپاشی ولتاژ نزدیک می شود، با افزایش بار، دامنه ولتاژ برخی از باس ها به سرعت کاهش می یابد. بعضی از مشکلات ناپایداری با استفاده از پشتیبان های توان راکتیو مناسب مثل بانک ها خازنی و یا به طور کلی عناصر خانواده FACTS مثل جبرانساز توان راکتیو ایستا قابل برطرف کردن هستند. جبرانساز توان راکتیو ایستا به دلیل قابلیت های مختلف آن و همچنین توانایی فراهم نمودن توان راکتیو در هر دو جهت خازنی و سلفی بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. جبرانساز توان راکتیو ایستا قادر به تأمین توان راکتیو در یک رنج خاص می باشد که بستگی به مقادیر سوسپتانس راکتور و خازن استفاده شده در آن دارد. جبرانساز توان راکتیو ایستا به صورت یک سوسپتانس متغیر موازی مدل می شود. اگر چه وقتی جبرانساز توان راکتیو ایستا به محدوده عملکرد خودش می رسد، به صورت یک سوسپتانس ثابت موازی مدل خواهد شد. تأثیر جبرانساز توان راکتیو ایستا بر پایدارسازی سیستم و از بین بردن نوسانات شبکه در بعضی موارد بررسی شده است. یک مدل غیر خطی درجه سه برای جبرانساز توان راکتیو ایستا ارائه شده و با استفاده از روش کنترل مد لغزشی یک کنترلر غیر خطی طراحی شده است[۹-۱۲].

در عمل مقدار برخی پارامترهای سیستم به سختی قابل تعیین کردن هستند. به عنوان مثال راکتانس خط انتقال و ثابت زمانی رگولاتور جبرانساز توان راکتیو ایستا، ممکن است دارای نامعینی هایی باشند. در زمانهایی که این نامعینی ها بزرگ باشند تنظیم کنترل کننده بسیار مشکل است. کنترلر مد لغزشی برای غلبه بر این مشکل پیشنهاد می شود. با استفاده از این روش با وجود تغییرات و نامعینی در پارامترهای سیستم قدرت، کنترلر عملکرد موثر خود را حفظ خواهد نمود و نیازی به تنظیمات مجدد نخواهد داشت. در این پایان نامه با استفاده از روش غیر خطی کنترل مد لغزشی، جبرانساز توان راکتیو ایستا کنترل خواهد شد و در نهایت عملکرد کنترلر مد لغزشی با کنترلر سنتی تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر مقایسه خواهد شد.

# فصل ۲–کنترل توان راکتیو

اغلب اجزاء سیستم حتی اکثر مصرف کننده ها که بار سیستم محسوب می شوند توان راکتیو مصر ف می کنند . بنابراین شبکه باید قابلیت تأمین این توان راکتیو را داشته باشد و اگر بحث انتقال توان راکتیو به عللی امکان پذیر نبود باید این توان راکتیو در محل ، تولید شود . این امر در مورد توان اکتیو هم صادق است اما قیود و محدودیتهای مربوط به انتقال آن به مراتب کمتر از توان راکتیو است . ثابت می شود که امکان انتقال توان راکتیو تنها زمانی وجود دارد که اندازه ولتاژ ابتدا وانتهای خط با هم متفاوت باشند. در عوض انتقال اکتیو مستلزم جابجایی فاز ولتاژهای ابتدا و انتهای خط می باشد . نقش عمده دیگر توان راکتیو در شبکه ، کنترل ولتاژ روی نقاط کلیدی است. ولتاژ خط باید به اندازه ای بالا باشد که بتواند بارها را تحمل کند و از طرفی نباید از حد شکست عایقی فراتر رود . عمل کنترل ولتاژها در نقاط کلیدی ، طی سالیان گذشته و از دیرباز و در سطح وسیع به وسیله تولید یا مصرف توان راکتیو در نقاط کلیدی صورت می گیرد. فشار روز افزون در جهت بهره برداری حداکثر ممکن از سیستم های انتقال ، لزوم این عمل کنترلی را بیش از پیش آشکار می سازد. در سالهای دور به منظور رشد شبکه قدرت و برای حمایت ولتاژ و بهبود توانایی انتقال توان ، از کندانسور سنکرون استفاده می شد .توسعه سریع خازن های موازی و اقتصادی بودن این خازن ها منجر به جایگزین شدن آنها به جای کندانسور سنکرون در سیستم انتقال گردید. عملاً مشاهده شد وظائف کندانسور سنکرون را می توان از کلیدزنی خازن های موازی با هزینه بسیار کمتر به دست آورد. بخشی از توان راکتیو در عناصر سری شبکه، مثلاً در راکتانس خطوط و ترانسفورماتور، مصرف می شود . از این رو ، یکی از روش های مستقیم افزایش توان انتقالی در سیستم انتقال و کاهش افت ولتاژ در سیستم توزیع ، جبران بخشی از راکتانس اندوکتیو سری به وسیله خازن های سری است . البته عموماً این مسئله را از دیدگاه کاهش راکتانس مورد عنایت قرار می دهند. در

جبرانسازی با خازن های سری به مسائلی بر می خوریم که آنها را برای استفاده در سیستم های توزیع نامناسب می کند ، لیکن بهترین شیوه افزایش ظرفیت توان انتقالی درقدرتهای بالا و شبکه های انتقال اصلی به شمار می‌آید.

## ۲–۱– اهمیت کنترل توان راکتیو

کنترل توان راکتیو به دلایل متعددی اهمیت روز افزون پیدا کرده است . با توجه به قیمت سوخت نیاز به بهره برداری بهینه از سیستم های قدرت افزایش پیدا کرده است . یک اصل مهم این است که برای توزیع یک مقدار معین توان با به حداقل رساندن پخش توان راکتیو کل ، تلفات کاهش می یابد. از طرف دیگر عموماً به خاطر میزان بالای نرخ سود و خصوصاً به خاطر مشکلات مربوط به حریم خطوط انتقال ، از توسعه و احداث شبکه های انتقال جلوگیری می شود . این در حالی است که کارخانجات و صنایع مادر مجبورند به منظور افزایش بهره وری در حداکثر توان خود کار کنند و صنایع جدید روبه افزایش است که باید بار آنها را به شبکه تامین کند . در اینجا نیز لزوم استفاده از وسایل کنترل توان راکتیو و بهبود پایداری احساس می شود.

نکته دیگر دوری منابع تولید انرژی الکتریکی از مراکز مصرف است . برای انتقال فواصل طولانی ، مسائل مربوط به پایداری و کنترل ولتاژ به توان راکتیو مربوط می شود . به واسطه مصرف روز افزون وسایل الکترونیکی حساس نظیر رایانه و تلویزیون های دیجیتالی و همچنین رشد صنایع با فرآیند پیوسته ، نیاز به داشتن تغذیه با کیفیت بالا افزایش یافته است. کاهش ولتاژ یا فرکانس ، اثرات نامطلوبی را بر روی چنین بارهایی اعمال می کند و قطع تغذیه می تواند خیلی پر هزینه و زیان آور باشد.

کنترل توان راکتیو یک ابزار اساسی در حفظ کیفیت تغذیه است ؛ به خصوص برای جلوگیری از اغتشاشات ولتاژ که از عمومی ترین نوع اغتشاش می باشد. انواع معینی از بارهای صنعتی و از آن جمله کوره های الکتریکی ، دستگاههای حفاری و دستگاههای جوشکاری با دریافت توان اکتیو و راکتیو از سیستم تغذیه ، تغییرات سریع و وسیع را بر آن تحمیل می کند و اغلب لازم است با بکارگیری وسایل تثبیت کننده ولتاژ ، نظیر جبران کننده های توان راکتیو استاتیکی این تغییرات را کاهش داد. از منظر دیگر با احداث و توسعه خطوط انتقال dc در سمت مصرف کننده های ac ، برای بهبود عمل کوموتاسیون و تثبیت ولتاژ باید توان راکتیو کنترل شود.

## ۲–۲– نیازمندیهای اساسی در انتقال توان ac

انتقال مقدار عظیم توان الکتریکی ac وقتی امکان پذیر است که نیازمندیهای اساسی زیر را تأمین کند:

اول اینکه ماشین های سنکرون بزرگ نباید از حالت سنکرون خارج شوند . مفهوم اصلی نگهداری حالت سنکرون و به ویژه ژنراتورها پایداری است ؛ به این معنا که بتوانند به کار خود در شرایط سنکرون با ماشین های دیگر ادامه دهند. علاوه بر آن پایداری عبارت است از توانایی سیستم قدرت برای آنکه بتواند در برابر اغتشاشات اتصال کوتاه ، رعد و برق ، تغییر بار و یا کلیدزنی خود را باز یابد. یکی از محدودیت های بهره برداری از خطوط انتقال این است که در یک خط با طول معین ، با افزایش توان انتقالی پایداری آن کاهش می یابد.

اگر توان انتقالی به تدریج و بدون اغتشاش فاحش افزایش یابد در سطح معینی از توان انتقالی سیستم ناگهان ناپایدار می شود . این سطح توان انتقالی را حد پایداری ماندگار می گویند . زیرا به لحاظ تئوری ، ماکزیمم توانی است که می تواند در حالت ماندگار انتقال یابد . این حد یک مقدار ثابت و غیر قابل تغییر نیست بلکه بسته به شرایط مختلف تغییر می کند.

در عمل ، سیستم انتقال نمی تواند خیلی نزدیک به حد پایداری ماندگارش کار کند بلکه باید برای اغتشاشاتی نظیر تغییر ناگهانی بار ، اتصالی و عمل کلیدزنی فاصله اطمینانی را در توان انتقالی در نظر گرفت.

برای معین کردن یک فاصله اطمینان مناسب ، مفهوم پایداری دینامیکی مفید خواهد بود. یک سیستم انتقال از نظر دینامیکی پایدار است وقتی که عملکرد نرمال خود را پس از یک اغتشاش کوچک باز یابد.

دوم اینکه مقدار ولتاژ باید نزدیک به مقدار نامی آن باشد. کاهش ولتاژ که عموماً در اثر بار زیاد یا قطع تولید ایجاد می شود منجر به رفتار و عملکرد نامطلوب بار ، مخصوصاً در موتورهای القایی می شود. کاهش ولتاژ ناگهانی ممکن است در اثر اتصال دادن بارهای خیلی بزرگ ایجاد گردد. اضافه ولتاژ نیز دلایل متعدد دارد . کاهش بار در قسمت های معینی از سیکل بار روزانه سبب افزایش ولتاژ تدریجی می شود که اگر کنترل نشود موجب شکست عایقی خواهد شد . حتی اگر به حد شکست عایقی نرسیده باشد در اثر استمرار در عایق خستگی ایجاد نموده و موجب شکست می شود. در خطوط انتقال بلند چنانچه از جبران کننده ها استفاده نشده باشد اثر اضافه ولتاژ در بار کم[۸] مقدار توان انتقالی و فاصله انتقال را محدود می کند.

[8] Ferranti Effect

## ۲-۳- ادوات FACTS

امروزه بیشتر شبکه‌های انتقال نیرو در جهان به یکدیگر متصل شده‌اند.این اتصال از ارتباطات درون مناطق تا ارتباط فرامنطقه‌ای و سرانجام اتصال شبکه برق کشورهای مجاور به یکدیگر گسترش می‌یابد. این اتصالات به دلایل اقتصادی و جهت کاهش هزینه انرژی الکتریکی و نیز بهبود قابلیت اعتماد نیروگاهها حائز اهمیت خواهد بود.

یکی از اهداف شبکه انتقال، جدا از تحویل انرژی، به حداقل رسانی میزان انرژی مورد نیاز و هزینه سوخت می‌باشد. اتصال شبکه‌ها استفاده از امکان تنوع بارها، دسترس‌پذیری منابع و قیمت سوخت را به گونه‌ای ممکن می‌سازد که بتوان انرژی الکتریکی را با کمترین هزینه وقابلیت اطمینان قابل قبول تحویل داد. در حالت کلی، اگر سیستم توزیع انرژی بصورت خطوط شعاعی از نیروگاهها به مراکز مصرف و بدون ایجاد شبکه بود، دستیابی به قابلیت اعتماد مورد نظر به تعداد زیادی نیروگاه نیاز داشت و هزینه انرژی الکتریکی بسیار زیاد می شد. زمانی که انتقال از قابلیت کمی برخوردار باشد، نیاز مصرف را، صرف نظر از قدرت نیروگاهها، باید با تعداد نیروگاهها برطرف ساخت. در واقع وقتی که یک شبکه انتقال مناسب در اختیار باشد امکان استفاده از سیستم تولید کوچکتر و توزیع شده بصورت بسیار اقتصادی تر ممکن می‌شود. هر چند باید توجه داشت که هزینه خطوط انتقال و تلفات، در کنار مشکلاتی که جهت احداث خطوط انتقال جدید وجود دارد غالباً ظرفیت شبکه انتقال را محدود می‌سازد. در بررسی شبکه‌های موجود به نظر می‌رسد که در حالات زیادی توزیع اقتصادی انرژی و اشتراک منابع تحت تاثیر ظرفیت شبکه انتقال قرار می‌گیرد و راه حل بهتری از حالت موجود قابل دسترس نیست.

از سوی دیگر با رشد انتقال توان، سیستم روز به روز پیچیده‌تر شده و در برابر حوادث عمده آسیب‌پذیرتر خواهد شد. این امر به انتقال توانهای بالا با کنترل ناقص، وجود توان راکتیو بیش از اندازه در نقاط مختلف سیستم نوسانات دینامیکی بزرگ بین نقاط مختلف شبکه و گلوگاهها و قابلیت بهره‌برداری کمتر از اتصال سیستمهای انتقال می‌انجامد.

از میکروالکترونیک، کامپیوتر و سیگنالهای مخابراتی پرسرعت عموماً برای حفاظت و کنترل شبکه انتقال استفاده می‌شود، اما در نهایت وقتی سیگنال کنترلی برای اعمال به سیستم به کلیدهای مکانیکی اعمال می‌شوند، کنترل سریع وجود ندارد. یکی دیگر از مشکلاتی که در قطعات مکانیکی وجود دارد این است که فرامین کنترلی به تعداد زیاد قابل اعمال نیستند زیرا این قطعات در مقایسه با قطعات الکترونیکی به سرعت فرسوده می‌شوند. طراحان سیستم قدرت، بهره‌بردارها و مهندسین آموخته‌اند که با استفاده از یک سری ترفندهای ابتکاری با این محدودیتها زندگی کنند تا سیستم بصورت موثری به کار خود ادامه دهد اما این امر به قیمت محدودیت بیشتر در بهره‌برداری تمام می‌شود. این مسائل با استفاده محتاطانه و انتخابی از تکنولوژی FACTS قابل حل می‌باشند.

در سالهای اخیر میزان تقاضای بیشتری به شبکه‌های انتقال جهان تحمیل شده و این میزان به واسطه نرخ فزاینده مولدهای خصوصی و رقابت روزافزون برسر استفاده از این مولدها مرتباً رو به افزایش است. افزایش تقاضا، عدم وجود طراحی بلند مدت و نیاز به دستیابی آزاد مصرف کننده به نیروگاهها میزان امنیت شبکه را به خطر انداخته و کیفیت توان را دچار مخاطره می‌نمایند. تکنولوژی FACTS با ایجاد امکان بیشترین استفاده از سرویس دهنده برای مشترک و افزایش قابلیت اعتماد شبکه برای کاهش مقداری از این مشکلات ضروری است. تاکید براین نکته ضروری است که در بسیاری از موارد نیاز به افزایش ظرفیت موجود، ساخت خطوط جدید و یا بهینه سازی امکاناتی از قبیل جریان و ولتاژ شبکه فعلی ، ضروری خواهد بود.

## ۲-۴- قابلیتها و امکاناتFACTS

آنچه در مورد FACTS مورد توجه طراحان شبکه قرار گرفته این است که این تکنولوژی امکانات جدیدی را جهت کنترل توان و افزایش ظرفیت خطوط موجود فراهم می‌آورد. این امکان که بتوان جریان عبوری را از خطی که از لحاظ هزینه مقرون به صرفه‌تر است عبور دهیم طراح را قادر می‌سازد تا با استفاده از هادی بزرگتر و کنترل کننده‌های FACTS توان را چه در شرایط عادی و چه شرایط اضطراری وادار به عبور از این خطوط نماییم.

این قابلیت‌های FACTS از آنجا ناشی می‌شود که این کنترل کننده‌ها قادرند پارامترهای مهم و کنترل کننده شبکه شامل امپدانس سری، امپدانس موازی، جریان ، ولتاژ، زاویه فاز و میزان میرایی نوسانات زیر فرکانس نامی را تغییر دهند. تغییر این قیود بصورت مکانیکی و با حفظ قابلیت اطمینان مطلوب، به کاهش ظرفیت انتقال می‌انجامد. در حالیکه کنترل کننده‌های FACTS با افزایش انعطاف‌پذیری سیستم، می‌توانند یک خط انتقال را قادر سازند تا توانی نزدیک به ظرفیت حرارتی خود را انتقال دهد. از سوی دیگر کلیدزنی مکانیکی باید توسط قطعات الکترونیک قدرت با سرعت بالا همراهی شود و نمی‌توان FACTS را جایگزین کامل کلیدزنی مکانیکی تلقی کرد.

تکنولوژی FACTS تنها شامل یک کنترل کننده پر قدرت نیست، بلکه مجموعه‌ای از کنترل کننده‌ها به شمار می‌رود که قادرند به تنهایی یا در ارتباط با دیگر مجموعه‌ها برای کنترل یک یا چندین پارامتر سیستم مورد استفاده قرار گیرند. انتخاب مناسب کنترل کننده FACTS می‌تواند موجب غلبه بر محدودیتهای خط انتقال یا شبکه طراحی شده شود. از سوی دیگر، از آنجا که تمامی کنترل کننده‌های FACTS از یک نوع تکنولوژی پایه استفاده می‌کنند می‌توان در ساخت آنها از مزایای تکنولوژی کوچک سازی ابعاد استفاده کرد. همانطور که ترانزیستور عنصر اساسی تمامی تراشه‌های میکروالکترونیکی است تریستور یا ترانزیستور با توان بالا نیز عنصر اساسی کنترل کننده‌های الکترونیک قدرت به شمار می‌رود.

تقاضای روبه افزایش برای انتقا ل قدرت، نبود برنامه ریزی دراز مدت در گذشته و نیاز به دسترسی آزاد مراکز تولید انرژی، کمپانی ها و مشتریان مربوطه را به سمت مسیری سوق داد که بتوانند با استفاده از آن ، خطوط انتقال ac موجود را با هدف افزایش بهره وری و حصول اطمینان از کیفیت بالا اصلاح نموده ، در نهایت ، خطوط ac انعطاف پذیری در اختیار داشته باشد.

ادوات FACTS یک تکنولوژی پیشرفته برای تسکین بخش عمده ای از مشکلات موجود است ؛ هر چند نمی تواند همه آنها را مرتفع سازد. تکنولوژیFACTS این فرصت را فراهم می آورد تا درصد کارایی و ظرفیت خطوط ac قدیمی و همین طور کنترل توان آنها تا حد خطوط جدید و به روز شده ، ترقی داشته باشند .

امکان کنترل جریان و در نتیجه توان عبوری از یک خط ، افزایش بالقوه ای در ظرفیت خطوط موجود فراهم می آورد. این فرصتها ناشی از توانایی کنترلرهای FACTS در کنترل پارامترهای مرتبط مهمی است که بر عملکرد سیستم های انتقال حاکم هستند. این پارامترها عبارتند از:

۱) امپدانس سری

۲) امپدانس موازی

۳) جریان

۴) ولتاژ

۵) زاویه فاز

۶) میزان میرایی نوسانات

## ۲-۵- محدودیتهای ظرفیت بارگذاری

اساساً سه دسته محدودیت وجود دارند:

- حرارتی (محیطی)
- دی‌الکتریک

- پایداری

## ۲–۵–۱– محدودیتهای حرارتی

ظرفیت حرارتی یک خط هوایی تابعی از دمای محیط، شرایط وزش باد، شرایط هادی و زمین می‌باشد. ظرفیت یک خط معمولاً بصورت محافظه کارانه‌ای تعیین می‌شود که بدترین احتمال را برای شرایط پیرامونی در بر گیرد. این شرایط به ندرت رخ می‌دهد و معمولاً وضع از این حالت بهتر است. بعضی از نرم‌افزارها شرایط زمستان و تابستان را بصورت جداگانه بررسی می‌کنند که حاشیه اطمینانی را بدست می‌دهد. از سوی دیگر نرم‌افزارهای کامپیوتری موجود می‌توانند ظرفیت بارگذاری را براساس شرایط محیطی مختلف و تاریخچه بارگیری خط، محاسبه کنند. همچنین نرم افزارهایی نیز وجود دارد که می‌توانند بصورت آنلاین خط را بررسی کرده و ظرفیت آنرا در هر شرایط بیان دارند. این روشها در طی سالها رشد کرده‌اند و عمر آنها به سن اتوماسیون می‌رسند و می‌توانند روزبه روز، ساعت به ساعت و بصورت لحظه به لحظه اطلاعات ظرفیت خط را بصورت قابل اطمینانی ارائه دهند. در بعضی موارد ممکن است شرایط محیطی از آنچه فرض شده بدتر باشد و در این حالت تعیین ظرفیت عملی خط بسیار ضروری است.

افزایش ظرفیت خط انتقال شامل در نظر گرفتن ظرفیت واقعی ترانسها و دیگر تجهیزات می‌شود و برای افزایش ظرفیت انتقال لازم است بعضی از این تجهیزات تغییر کنند. ظرفیت بارگذاری واقعی ترانسها نیز تابعی از دما، سن ترانس و تاریخچه بارگیری از آن می‌باشد.

امکان دیگری نیز برای ارتقاء ظرفیت خط با تغییر هادی وجود دارد که به نوبه خود تغییرات ساختاری را شامل می‌شود. در نهایت می‌توان خط را بصورت دو مداره طرح نمود. این طرح می‌تواند ظرفیت را ارتقاء دهد اما این سوال ها پیش می‌آید:

آیا توان اضافی جریان خواهد یافت و قابل کنترل خواهد بود؟

آیا شرایط ولتاژ در صورت افت ناگهانی بار قابل پذیرش است؟

استفاده از FACTS می‌تواند به استفاده موثر از این ظرفیت جدید بیانجامد.

## ۲–۵–۲– محدودیت دی الکتریک

از دیدگاه عایقی، خطوط بسیار محافظه کارانه طراحی می‌شوند. در این مورد می‌توان تا ۱۰٪ ولتاژ نامی یا حتی بیشتر، اضافه ولتاژ روی خط قرار داد و باید توجه داشت که اضافه ولتاژهای دینامیک در محدوده قابل قبول باشند. برقگیرهای بدون

فاصله هوایی و مقره‌های دارای برقگیر اجازه افزایش ظرفیت ولتاژ از خط و ایستگاه را می‌دهند. تکنولوژی FACTS می‌تواند به ایجاد حاشیه امنیت بالاتر در شرایط فلوی بیشتر توان و افزایش ولتاژ کمک کند.

## ۲-۵-۳- محدودیت پایداری

تعدادی از شرایط پایداری، ظرفیت انتقال را محدود می‌کنند:

- ✓ پایداری انتقال
- ✓ پایداری دینامیک
- ✓ پایداری ماندگار
- ✓ فروپاشی فرکانس
- ✓ فروپاشی ولتاژ
- ✓ تشدید سنکرون

در این زمینه مراجع زیادی وجود دارد و از حوصله این بحث خارج است و تنها به ذکر این مطلب اکتفا می‌کنیم که عناصر FACTS قادرند برهر نوع محدودیت پایداری غلبه کنند.

## ۲-۶- انواع کنترل کننده‌هایFACTS

عموماً کنترل کننده‌های FACTS را می‌توان در ۴ گروه عمده قرار داد:

- ✓ کنترل کننده‌های سری
- ✓ کنترل کننده‌های موازی
- ✓ کنترل کننده‌های ترکیبی سری-سری
- ✓ کنترل کننده‌های ترکیبی سری-موازی

### ۲–۶–۱– کنترل کننده‌های سری

کنترلر سری می‌تواند یک امپدانس متغیر مانند یک خازن یا راکتور و یا یک منبع(در فرکانس نامی، فرکانس سنکرون یا هارمونیک) کنترل شده با قطعات قدرت باشد. اساساً تمامی کنترل کننده‌های سری یک ولتاژ سری را به خط تزریق می‌کنند. تا زمانی که این ولتاژ با جریان خط در یک ربع فاز قرار دارند، کنترلر سری تنها توان راکتیو تولید یا مصرف می‌کند. هر ترکیب فازی دیگر می‌تواند به تولید یا مصرف توان اکتیو بیانجامد.

### ۲–۶–۲– کنترل کننده‌های موازی

مشابه با کنترل کننده‌های سری، این کنترلرها هم می‌توانند یک امپدانس متغیر، منبع متغیر یا ترکیبی از ایندو باشند. اساساً تمامی کنترلرهای موازی جریانی را به سیستم تزریق می‌کنند. حتی یک امپدانس موازی متغیر متصل به مدار به علت ولتاژی که در دوسر آن قرار می‌گیرد، جریانی را در نقطه تماس به مدار تزریق می‌کند. در این مورد هم تا وقتی جریان تزریقی با ولتاژ خط در یک ربع فاز باشند، تنها توان راکتیو مصرف یا تزریق می‌شود.

### ۲–۶–۳– کنترلر ترکیبی سری–سری

این حالت می‌تواند ترکیبی از کنترلرهای سری مجزا باشد که بصورت هماهنگ در یک سیستم با چند خط، کار می‌کنند. کنترلرها توانهای جداگانه‌ای را به خطوط تزریق می‌کنند و بین دو خط از طریق ارتباط موجود، توان اکتیو جریان می‌یابد. امکان عبور توان اکتیو در کنترلر واحد، تحت عنوان کنترلر فلوی بین خطوط، امکان برقراری تعادل همزمان را بین فلوی توان اکتیو و راکتیو در خطوط و بهره‌برداری بهینه از سیستم انتقال را فراهم می‌سازد. توجه کنید که کلمه واحد در اینجا به معنای این است که ترمینال DC مبدل همه کنترلرها برای انتقال توان اکتیو به هم متصل شده‌اند.

### ۲–۶–۴– کنترلر ترکیبی سری–موازی

این حالت ترکیبی از کنترلرهای سری-موازی است که بصورت ترکیبی با هم کار می‌کنند. اساساً این نوع کنترلرها در شاخه سری، ولتاژ و در شاخه موازی، جریان را به سیستم تزریق می‌کنند. وقتی کنترلرهای سری-موازی در یک سیستم واحد باشند امکان تبادل توان اکتیو بین آنها وجود دارد.