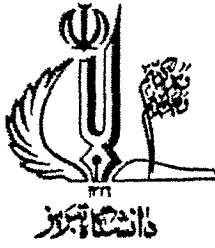


صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه برق- قدرت

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق- قدرت

عنوان

ارائه یک جبرانساز بهینه برای میرا کردن نوسانات
زیرسنکرون (SSR)

استادان راهنما

دکتر محمدرضا فیضی

دکتر محمد باقر بناء شریفیان

استاد مشاور

مهندس قاسم اهرابیان

پژوهشگر

مجید ولی زاده

شهریور ۱۳۸۶

۴۷۷۹۳

۱۳۸۶ / ۱۲ / ۸

سپاس فدای بی همتا، را که با تبلور گوشه‌ای از علم بیکرانیش در قلم این مقید برای به نتیجه
رساندن این تلاش علمی مقانیتش را پیش از پیش بر من ممرض گردانید.

قطره‌ای در مقابل یک دنیا لطف و فداکاری! ناقابل کاری است حاصل نوزده سال تحصیل علم، آن را
تقدیم می‌کنم به روح بزرگووار مادر عزیزم که مصداق واقعی فداکاری و گذشت بود همچون شمع از
جان برایم مایه گذاشت تا روشنگر راهم باشد. تقدیم به پدر عزیزم که بی‌هیچ ادعایی دلسوزانه مشوق
راهم است.

در اینجا بر خود لازم می‌بینم که از زحمات و راهنمایی‌های استاد عزیزم جناب آقای دکتر فیضی کمال
تشکر را داشته باشم همچنین از راهنمایی‌های ارزنده جناب آقای دکتر شریفیان تشکر می‌نمایم. بی‌شک
مشاوره ارزشمند استاد ارجمندم جناب آقای مهندس اهرابیان در انجام این کار پژوهشی قابل ستایش و
سپاسگزاری است.

تشکر ویژه و خالصانه خود را تقدیم برادر عزیزم جناب آقای مهندس مهدی ولی‌زاده می‌نمایم که در
تمام طول زندگی‌ام مشاور، دلسوز و روحیه‌بخش من بوده‌اند.

همچنین از کلیه دوستانم به خصوص آقایان علی یزدان پناه، هادی رزمی و مهران صباحی که در این
مدت مرا تحمل کرده‌اند، کمال تشکر را دارم.

مجید ولی‌زاده

دانشگاه تبریز

شهریور ۱۳۸۶

نام خانوادگی دانشجو: ولی زاده	نام: مجید
عنوان پایان نامه: ارائه یک جبرانساز بهینه برای میرا کردن نوسانات زیرسکرون (SSR)	
استادان راهنما: دکتر محمدرضا فیضی - دکتر محمدباقر بناء شریفیان	
استاد مشاور: مهندس قاسم اهراییان	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: برق
گرایش: قدرت	دانشگاه: تبریز
دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر	تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۱۳۸۶
تعداد صفحه: ۱۱۶	
کلید واژه‌ها: جبرانسازی خازنی سری، تشدید زیرسکرون، پارامترهای سیم پیچ دمپر، ادوات FACTS	
چکیده:	
<p>استفاده از خازن سری در خطوط انتقال به منظور افزایش قدرت انتقالی ماکزیمم و بهبود پایداری ماندگار، کاهش تلفات الکتریکی خط انتقال، کاهش افت ولتاژ و ایجاد پروفیل ولتاژ بهتر در طول خط، بهبود پایداری گذرا و کاهش حساسیت ولتاژ به اختلالات در حالت گذرا یک انتخاب مناسب است. از طرفی قراردادن خازن سری در خط انتقال باعث ایجاد تشدید بین مودهای پیچشی شفت توربین-ژنراتور و شبکه انتقال الکتریکی جبرانسازی شده با خازن سری می شود. در صورتی که نوسانات ایجاد شده در اثر پدیده تشدید میرا نشوند به شفت صدمه وارد می کند. روش های مختلفی برای تحلیل پدیده SSR در مقالات معرفی شده است که هر یک دارای قابلیت ها و نقاط ضعفی هستند. با توجه به اینکه هدف از این پایان نامه بررسی تاثیر عواملی مختلف مانند پارامترهای سیم پیچ دمپر بر پدیده SSR بوده از این روش تحلیل مقادیر ویژه، که یک روش محاسباتی می باشد، برای مطالعه انتخاب شده است. با تحلیل پارامترهای سیم پیچ دمپر اثر آنها در پایدار نمودن نوسانات ناشی از SSR مشخص شده و با انتخاب مقادیر مناسب این پارامترها سیستم پایدار شده است. بررسی ها بر روی معیار اول IEEE انجام شده است. با ورود ادوات FACTS به شبکه قدرت، ساختار شبکه دستخوش تغییرات زیادی شده به طوری که در هر شبکه ای که خط انتقال جبران شده با خازن سری وجود دارد تحلیل SSR همواره باید مدنظر مدیران سیستم باشد. برای میرا کردن نوسانات معیار اول از ادوات FACTS مانند STATCOM، TCSC و NGH استفاده شده و با طراحی سیستم کنترلی این ادوات نوسانات مودهای پیچشی توربین-ژنراتور کاملا پایدار شده اند. در این پایان نامه با شبیه سازی زمانی پدیده تشدید زیرسکرون نتایج حاصل از تحلیل مقادیر ویژه مورد تایید قرار گرفته است.</p>	

۱	مقدمه
۴	فصل اول: بررسی منابع
۵	۱-۱- جبرانسازی سری
۸	۲-۱- انواع نوسانات فرکانس پایین
۸	۱-۲-۱- نوسانات محلی
۸	۲-۲-۱- نوسانات بین ناحیه‌ای
۹	۳-۲-۱- نوسانات داخلی
۹	۴-۲-۱- نوسانات پیچشی و تشدید زیرسنکرون
۱۰	۳-۱- اثر خود تحریکی ناشی از ژنراتور القایی
۱۳	۴-۱- استفاده از ادوات FACTS
۳۵	۵-۱- استفاده از شبکه عصبی مصنوعی
۴۰	۶-۱- تبدیل هیلبرت
۴۱	۱-۶-۱- تعریف سیگنال تحلیلی GABOR
۴۳	۷-۱- نتیجه‌گیری
۴۴	فصل دوم: مواد و روش‌ها
۴۵	۱-۲- انواع نوسانات SSR
۴۵	۱-۱-۲- تقابل پیچشی
۴۵	۲-۱-۲- اثر ژنراتور القایی
۴۶	۳-۱-۲- تقویت گشتاور
۴۶	۲-۲- روش‌های تحلیل پدیده SSR
۴۷	۱-۲-۲- روش اسکن فرکانس
۴۷	۲-۲-۲- روش تبدیل هیلبرت
۴۸	۳-۲-۲- روش شبیه‌سازی زمانی
۴۸	۴-۲-۲- تحلیل مقادیر ویژه
۵۰	۳-۲- سیستم‌های تست مورد استفاده در بررسی SSR
۵۱	۴-۲- مدلسازی سیستم قدرت به فرم فضای حالت
۵۲	۱-۴-۲- معادلات ژنراتور سنکرون
۵۷	۲-۴-۲- مدلسازی خط انتقال
۵۹	۳-۴-۲- مدلسازی سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور
۶۴	۴-۴-۲- مدلسازی محفظه‌های توربین
۶۷	۵-۴-۲- مدلسازی گاورنر
۷۰	۶-۴-۲- مدلسازی سیستم تحریک
۷۳	۷-۴-۲- مدلسازی کامل معیار اول IEEE
۷۴	۵-۲- اثر مدارات دمپر بر نوسانات SSR
۷۵	۶-۲- ادوات FACTS
۷۹	۷-۲- ارائه مدل فضای حالت STATCOM برای میرا کردن نوسانات SSR

۸۵	فصل سوم: بحث و نتایج
۸۶	۱-۳- مقدمه
۸۷	۲-۳- بررسی سیستم معیار اول IEEE بدون جبران‌ساز
۸۹	۳-۳- بررسی اثر پارامترهای دمپر بر نوسانات SSR
۹۰	۳-۳-۱- اثر پارامترهای سیم‌پیچ دمپر D
۹۳	۳-۳-۲- اثر پارامترهای سیم‌پیچ دمپر S
۹۶	۳-۳-۳- اثر پارامترهای سیم‌پیچ دمپر Q
۱۰۴	۳-۴- تاثیر استفاده از STATCOM در میرا کردن نوسانات SSR
۱۰۷	۳-۵- تاثیر استفاده از TCSC در میرا کردن نوسانات SSR
۱۰۸	۳-۶- تاثیر استفاده از NGH در میرا کردن نوسانات SSR
۱۱۰	۳-۷- تاثیر استفاده از سیستم تحریک در میرا کردن نوسانات SSR
۱۱۲	۳-۸- نتیجه‌گیری
۱۱۳	پیشنهادات
۱۱۴	مراجع و منابع

۲۱	جدول ۱-۱ مقادیر ویژه سیستم با و بدون SSSC برای دو نقطه کاری
۷۴	جدول ۱-۲ مقادیر ویژه مودهای پیچشی معیار اول IEEE به ازای چند درصد جبرانسازی مختلف
۷۸	جدول ۲-۲ تعدادی از TCSCهایی که در حال حاضر مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند
۷۸	جدول ۳-۲ تعدادی از STATCOMهایی که در حال حاضر مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند
۸۸	جدول ۱-۳ مقادیر ویژه مودهای پیچشی معیار اول IEEE به ازای چند درصد جبرانسازی مختلف
۱۰۰	جدول ۲-۳ مقادیر ویژه مودهای پیچشی معیار اول IEEE به ازای طراحی جدید
۱۰۰	جدول ۳-۳ مقایسه قابلیت طراحی جدید با توجه به شاخص‌های مینیمم و متوسط

۷	شکل ۱-۱ مجتمع خاز سری
۱۰	شکل ۲-۱ اثر متقابل مودها برهم
۱۱	شکل ۳-۱ مدل مداری ژنراتور القایی
۱۱	شکل ۴-۱ مدل مداری ساده شده ژنراتور القایی
۱۳	شکل ۵-۱ تغییرات مقاومت و راکتانس شبکه دیده شده از نقطه خنثی ژنراتور
۱۵	شکل ۶-۱ روش کنترلی جریان ثابت برای TCSC
۱۶	شکل ۷-۱ روش کنترلی توان ثابت برای TCSC
۱۶	شکل ۸-۱ روش کنترلی POD برای TCSC
۱۷	شکل ۹-۱ دیاگرام تعیین بهره مناسب برای کنترل کننده TCSC
۱۸	شکل ۱۰-۱ ضریب گشتاور میرایی برای خازن ثابت و مقادیر مختلف β
۱۸	شکل ۱۱-۱ مشخصه امیدانسی TCSC برای $\beta = 20$
۱۹	شکل ۱۲-۱ مشخصه امیدانسی TCSC برای $\beta = 30$
۲۰	شکل ۱۳-۱ دیاگرام تک خطی سیستم تست به همراه مدل جرم و فنر
۲۰	شکل ۱۴-۱ دیاگرام کنترلی SSSC
۲۲	شکل ۱۵-۱ گشتاور پیچشی سیستم با ۳۰ درصد جبرانسازی بدون SSSC
۲۳	شکل ۱۶-۱ گشتاور پیچشی سیستم با ۳۰ درصد جبرانسازی خازنی و ۱۵ درصد توسط SSSC
۲۴	شکل ۱۷-۱ معیار اول IEEE مجهز شده به SVC کنترل شده از راه دور
۲۴	شکل ۱۸-۱ سیستم تست دو ژنراتوری مجهز شده به SMES
۲۵	شکل ۱۹-۱ شمای مداری SMES
۲۵	شکل ۲۰-۱ تغییرات گشتاور پیچشی LP-GEN ژنراتور
۲۶	شکل ۲۱-۱ توپولوژیهای مختلف جبرانسازی سری
۲۷	شکل ۲۲-۱ قسمت حقیقی مود اول پیچشی: جبرانسازی متقارن، طرح ASCC با تشدید سری
۲۸	شکل ۲۳-۱ قسمت حقیقی مود اول پیچشی: جبرانسازی متقارن، طرح ASCC با تشدید موازی
۲۹	شکل ۲۴-۱ شمای رویت‌گر سیستم کنترلی تحریک
۳۰	شکل ۲۵-۱ شمای شبکه عملی مورد آزمایش
۳۱	شکل ۲۶-۱ مدل ۷ جرمی شفت توربین-ژنراتور
۳۱	شکل ۲۷-۱ گشتاورهای پیچشی G-EX و Shear pin A-B به ازای بهترین زمان سوئیچینگ
۳۲	شکل ۲۸-۱ شمای مدل رویت‌گر
۳۴	شکل ۲۹-۱ گشتاور پیچشی G-EX و Shear pin A-B
۳۵	شکل ۳۰-۱ سیستم کنترلی تحریک
۳۵	شکل ۳۱-۱ گشتاورهای پیچشی Shear pin A-B و G-EX با اعمال سیستم کنترلی پیشنهادی
۳۸	شکل ۳۲-۱ تغییرات سرعت شفت برای سیستم مجهز به راکتور موازی ثابت
۳۸	شکل ۳۳-۱ تغییرات سرعت شفت برای سیستم مجهز به راکتور موازی سوئیچ شونده عصبی
۳۹	شکل ۳۴-۱ شمای سیستم کنترلی SVC مجهز به شبکه عصبی
۳۹	شکل ۳۵-۱ شمای سیستم کنترلی تحریک مجهز به شبکه عصبی

- شکل ۱-۳۶ طریقه نمایش سیگنال تحلیلی در دستگاه دکاریتی و قطبی
- شکل ۱-۳۷ دامنه گشتاور پیچشی GEN-EXC به ازای فرکانس‌های مختلف
- شکل ۲-۱ درصد استفاده از سیستم‌های مختلف برای بررسی SSR
- شکل ۲-۲ اجزای لازم برای مدلسازی کامل پدیده SSR
- شکل ۲-۳ ژنراتور سنکرون با نمایش سیم‌پیچ‌های استاتور، میدان و دمپر
- شکل ۲-۴ مدل مدار معادل خط انتقال به کار رفته در معیار اول IEEE
- شکل ۲-۵ دیاگرام فازوری ولتاژها در دستگاه d-q
- شکل ۲-۶ مدل جرم و فنر شفت توربین-ژنراتور نیروگاه بخار
- شکل ۲-۷ دیاگرام بلوکی سیستم توربین و گاورنر
- شکل ۲-۸ دیاگرام بلوکی سیستم کنترل تحریک
- شکل ۲-۹ نحوه قرار گرفتن ادوات FACTS در شبکه
- شکل ۲-۱۰ شمای کلی SSSC
- شکل ۲-۱۱ شمای مداری STATCOM به همراه معیار اول IEEE
- شکل ۲-۱۲ سیستم کنترلی پیشنهادی برای STATCOM
- شکل ۳-۱ تغییرات مدهای پیچشی به ازای تغییرات درصد جبران‌سازی ۱۰۰-۰٪
- شکل ۳-۲ اثر تغییرات X_D بر مود چهارم
- شکل ۳-۳ اثر تغییرات X_D بر مود سوم
- شکل ۳-۴ اثر تغییرات X_D بر مود دوم
- شکل ۳-۵ اثر تغییرات X_D بر مود اول
- شکل ۳-۶ اثر تغییرات X_S بر مود چهارم
- شکل ۳-۷ اثر تغییرات X_S بر مود سوم
- شکل ۳-۸ اثر تغییرات X_S بر مود دوم
- شکل ۳-۹ اثر تغییرات X_S بر مود اول
- شکل ۳-۱۰ اثر تغییرات X_Q بر مود پیچشی چهارم
- شکل ۳-۱۱ اثر تغییرات X_Q بر مود پیچشی سوم
- شکل ۳-۱۲ اثر تغییرات X_Q بر مود پیچشی دوم
- شکل ۳-۱۳ اثر تغییرات X_Q بر مود پیچشی اول
- شکل ۳-۱۴ تغییرات مدهای پیچشی به ازای مقدار X_Q بهینه برای درصد جبران‌سازی ۱۰۰-۰٪
- شکل ۳-۱۵ اثر تغییرات I_Q بر مود پیچشی چهارم
- شکل ۳-۱۶ اثر تغییرات I_Q بر مود پیچشی سوم
- شکل ۳-۱۷ اثر تغییرات I_Q بر مود پیچشی دوم
- شکل ۳-۱۸ اثر تغییرات I_Q بر مود پیچشی اول
- شکل ۳-۱۹ گشتاور پیچشی بین LPA-LPB توربین بخار در هنگام بروز SSR
- شکل ۳-۲۰ گشتاور پیچشی بین ژنراتور و محرک در هنگام بروز SSR
- شکل ۳-۲۱ گشتاور پیچشی بین LPA-LPB توربین بخار در سیستم مجهز به STATCOM
- شکل ۳-۲۲ گشتاور پیچشی بین ژنراتور و محرک در سیستم مجهز به STATCOM

- شکل ۳-۲۳ گشتاور پیچشی بین LPA-LPB توربین بخار در سیستم مجهز به TCSC ۱۰۷
- شکل ۳-۲۴ گشتاور پیچشی بین ژنراتور و محرک در سیستم مجهز به TCSC ۱۰۸
- شکل ۳-۲۵ گشتاور پیچشی بین LPA-LPB توربین بخار در سیستم مجهز به NGH ۱۰۹
- شکل ۳-۲۶ گشتاور پیچشی بین ژنراتور و محرک در سیستم مجهز به NGH ۱۱۰
- شکل ۳-۲۷ بلوک دیاگرام سیستم کنترل تحریک ۱۱۰
- شکل ۳-۲۸ گشتاور پیچشی بین LPA-LPB توربین بخار با استفاده از کنترل تحریک ۱۱۱
- شکل ۳-۲۹ گشتاور پیچشی بین ژنراتور و محرک با استفاده از کنترل تحریک ۱۱۱

ANN: Artificial Neural Network
AVR: Automatic Voltage regulator
FACTS: Flexible AC Transmission Systems
HP: High Pressure
HVDC: High Voltage DC Current
IP: Intermediate Pressure
LP: Low Pressure
NGH: Narain G. Hingorani scheme
PI: Proportional Integral
PID: Proportional Integral Derivative
PSS: Power System Stabilizer
SMES: Superconducting Magnetic Energy Systems
SSO: Sub Synchronous Oscillation
SSR: Sub Synchronous Resonance
SSSC: Static Synchronous Series Compensator
STATCOM: Static Synchronous Compensator
SVC: Static VAR Compensator
TCSC: Thyristors Control Series Capacitor

مقدمه

امروزه با توجه به شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در بسیاری از موارد نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی در فواصل بسیار زیاد از مراکز مصرف ساخته می‌شوند. لذا استفاده از خطوط انتقال برای رساندن انرژی به مصرف‌کننده‌ها اجتناب‌ناپذیر است.

برای افزایش ظرفیت انتقال توان الکتریکی دو روش وجود دارد. اولین روش نصب یک خط انتقال دیگر به صورت موازی با خط انتقال قبلی است که این کار مستلزم صرف هزینه‌ای زیاد بوده و تا زمانی که میزان مصرف تغییرات اساسی نداشته باشد معمولاً به دلایل اقتصادی از این روش استفاده نمی‌کنند.

روش دوم استفاده از خازن سری در خط انتقال است. در این روش، از تجهیزات موجود در سیستم بهره‌برداری بهینه صورت گرفته و نیاز مصرف‌کننده‌ها برآورده می‌شود. بنابراین به دلایل اقتصادی استفاده از خازن سری یک روش مناسب است.

با این وجود گذاشتن خازن سری در یک خط انتقال، مدار خط انتقال را به یک مدار RLC تبدیل می‌کند که دارای فرکانس طبیعی و فرکانس تشدید است. تداخل یکی از فرکانس‌های نوسانات پیچشی با این فرکانس تشدید ممکن است باعث ناپایداری و حتی صدمه دیدن شفت توربین-ژنراتور شود.

اولین بار پدیده تشدید زیرسنکرون در سال ۱۹۷۰ در نیروگاه Mohave اتفاق افتاد که منجر به خرابی شفت توربین-ژنراتور شد. به دنبال این اتفاق محققان به تجزیه و تحلیل مسئله پرداختند و دریافتند که تداخل مودهای پیچشی شفت توربین بخار با مود الکتریکی خط انتقال جبران شده توسط خازن سری عامل این مسئله بوده است.

ورود ادوات جدید به شبکه قدرت باعث شده که ساختار شبکه قدرت همواره در حال تغییر باشد از این رو در شبکه‌هایی که دارای خطوط جبران‌سازی شده با خازن سری هستند، تحلیل پدیده تشدید زیرسنکرون یکی از مسائل مهم است.

در مقالات مختلف روش‌های مختلفی برای بررسی این پدیده بیان شده که با توجه به هدف مطالعه، روش مناسب انتخاب می‌شود. در فصل دوم روش‌های مختلف آنالیز تشدید زیرسکرون شرح داده شده است. سپس با استفاده از قابلیت دینامیک بالای ادوات FACTS سعی شده پایداری سیستم بهبود داده شود. در این خصوص از ادواتی مانند STATCOM، TCSC و NGH استفاده شده و نتایج حاصل از آن‌ها با هم مقایسه شده‌اند.

از دیگر موارد بررسی شده در این پایان‌نامه تاثیر پارامترهای سیم‌پیچ دمپر بر پایداری نوسانات تشدید زیرسکرون است و با انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای سیم‌پیچ دمپر این نوسانات پایدار شده‌اند.

فصل سوم به ارائه نتایج و پیشنهادات می‌پردازد.

فصل اول

بررسی منابع

۱-۱- جبرانسازی سری

امروزه با توجه به شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در بسیاری از موارد نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی در فواصل بسیار زیاد از مراکز مصرف ساخته می‌شوند. لذا استفاده از خطوط انتقال برای رساندن انرژی به مصرف‌کننده‌ها اجتناب‌ناپذیر است.

از طرفی مقاومت خط تلف‌کننده توان حقیقی و خاصیت سلفی خط مصرف‌کننده توان راکتیو است. این درحالی است که با توجه به آرایش خطوط، جنس مواد تشکیل‌دهنده خطوط و سطح مقطع خط انتقال، مقدار توان عبوری از خط محدود می‌شود.

برای رفع این مسئله دو راه‌حل وجود دارد. اولین روش نصب یک خط انتقال دیگر به صورت موازی با خط انتقال قبلی است که این کار مستلزم صرف هزینه‌ای زیاد بوده و تا زمانی که میزان مصرف تغییرات اساسی نداشته باشد معمولاً به دلایل اقتصادی از این روش استفاده نمی‌کنند.

روش دوم استفاده از خازن سری در خط انتقال است. در این روش، از تجهیزات موجود در سیستم بهره‌برداری بهینه صورت گرفته و نیاز مصرف‌کننده‌ها برآورده می‌شود. بنابراین به دلایل اقتصادی استفاده از خازن سری یک روش مناسب است. در این روش درصد جبرانسازی سری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_{se} = \frac{X_{CY}}{X_L} \quad (1-1)$$

که در آن X_{CY} راکتانس خازن سری و X_L راکتانس القایی خط است.

اگر مقدار K_{se} زیاد و نزدیک عدد یک انتخاب شود، راکتانس سری خیلی کم شده و جریان خط بسیار زیاد می‌شود. معمولاً K_{se} در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۷ انتخاب می‌شود. راکتانس خط با اضافه شدن خازن سری برابر است با:

$$X = X_L - X_{CY} = X_L - K_{se} X_L = X_L (1 - K_{se}) \quad (2-1)$$

چنانچه از کاپاسیتانس خط صرفنظر شود با جایگزینی راکتانس X در رابطه توان رابطه زیر

به دست می آید:

$$P = \frac{|V_s||V_r|}{X_L(1-K_{se})} \sin \delta = \frac{V^2}{X_L(1-K_{se})} \sin \delta \quad (3-1)$$

رابطه (۳-۱) نشان می دهد که قدرت انتقالی ماکزیمم با افزایش درجه جبران کنندگی سری افزایش می یابد. همچنین برای یک توان داده شده ثابت P ، زاویه δ کاهش می یابد. این دو عامل باعث افزایش پایداری ماندگار و پایداری گذرای سیستم خواهند شد. در حقیقت نقش اصلی خازن سری در بهبود پایداری خطوط بلند است. هنگامی که در خطوط بسیار بلند خازن سری به کار می رود، از راکتور موازی نیز به طور همزمان برای کنترل ولتاژ حالت های کم بار و بی باری استفاده می شود.

ساخت و استفاده از خازن های سری از سال ۱۹۱۴ میلادی شروع شد. در سال ۱۹۳۰ واحدهای خازنی با قدرت نامی ۱۵ KVAR ساخته شد و در سال ۱۹۶۰ این قدرت به ۱۰۰ KVAR رسید. در حال حاضر اگرچه امکان ساخت خازن هایی با قدرت بیش از ۶۰۰ KVAR وجود دارد، لیکن اقتصادی ترین اندازه های خازن در حدود ۲۰۰ الی ۳۰۰ کیلووار می باشد. با ترکیب واحدهای خازنی، قدرت مورد نیاز خازنی که باید در خط انتقال نصب شود، به دست می آید. در سال ۱۹۲۸ یکی از اولین خازن های سری در نیویورک با قدرت ۱/۲۵ مگاوار تحت ولتاژ ۳۳ kV نصب شد که در آن از واحدهای خازنی ۱۰ کیلووار استفاده می شد. بعد از آن پیشرفت های زیادی در این زمینه بوجود آمده است.

در حال حاضر خازن های سری با ولتاژهایی تا ۵۵۰ kV و قدرت نامی تا ۸۰۰ MVAR نصب و مورد استفاده قرار گرفته اند [۱]. شکل (۱-۱) یک نمونه از مجتمع خازنی را نشان می دهد که در آن از واحدهای خازنی استفاده شده است.

به طور خلاصه مزایای استفاده از خازن سری را می توان به صورت زیر دسته بندی نمود:

۱- افزایش قدرت انتقالی ماکزیمم و بهبود پایداری ماندگار

۲- افزایش بار نرمال خط

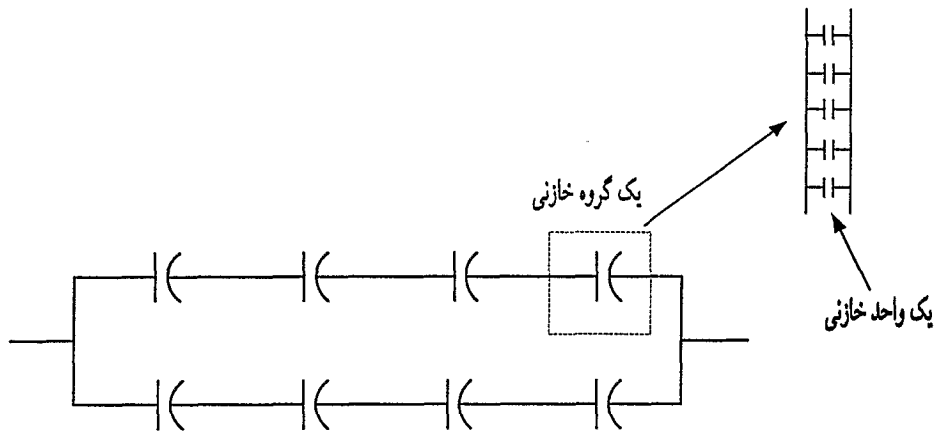
۳- کاهش زاویه انتقال δ در یک قدرت داده شده

۴- کاهش تلفات خط

۵- کاهش افت ولتاژ و ایجاد پروفیل ولتاژ بهتر در طول خط

۶- بهبود پایداری گذرا

۷- کاهش حساسیت ولتاژ به اختلالات در حالت گذرا



شکل (۱-۱)، شمای یک مجتمع خازن سری

بنابراین دیده می‌شود که استفاده از خازن سری یک امر ضروری است. اما با وجود همه این مزایا استفاده از خازن سری معایبی نیز دارد، با قرار دادن خازن سری در یک خط انتقال، مدار خط انتقال به یک مدار RLC تبدیل می‌شود که دارای فرکانس طبیعی و فرکانس تشدید است. تداخل یکی از فرکانس‌های نوسانات پیچشی با این فرکانس تشدید ممکن است باعث ناپایداری و حتی صدمه دیدن شفت توربین-ژنراتور شود.

۱-۲- انواع نوسانات فرکانس پایین

نوسانات فرکانس پایین نوساناتی هستند که فرکانس آن‌ها کمتر از ۶۰ هرتز است و شامل نوسانات محلی، نوسانات بین ناحیه‌ای، نوسانات داخلی و نوسانات پیچشی و تشدید زیرسکرون هستند. که در ادامه به شرح هر یک پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱- نوسانات محلی

این نوسانات بین یک نیروگاه و یک شبکه بزرگ اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، نوسانات محلی زمانی رخ می‌دهند که یک واحد مولد در یک نیروگاه، نسبت به بقیه شبکه نوسان نماید؛ محدوده فرکانسی این نوسانات ۱ تا ۲ هرتز است. این نوسانات معمولاً در نیروگاه‌هایی با سیستم تحریک سریع که بار آن زیاد بوده و توسط یک خط انتقال ضعیف به شبکه وصل باشد رخ می‌دهند.

۱-۲-۲- نوسانات بین ناحیه‌ای

این نوسانات بین تعداد زیادی از ماشین‌های یک قسمت شبکه و ماشین‌های قسمت دیگر شبکه به وجود می‌آید و محدوده فرکانس آنها ۰/۱ تا ۱ هرتز است. یکی از علت‌های اصلی این نوسانات وجود خط انتقال ضعیف بین دو ناحیه شبکه است مانند نوسانات مولدهای دو ناحیه همساز که توسط خطوط ضعیف به هم وصل شده باشند.

یکی از راه‌حل‌های بهبود پایداری دینامیکی شبکه اضافه کردن خطوط انتقال موازی برای کاهش راکتانس بین مولد و شبکه است. ولی چون این روش غیر اقتصادی است به جای آن از تنظیم کننده سرعت و کنترل کننده تحریک استفاده می‌کنند. علاوه بر این، حتی شبکه‌هایی که خطوط انتقال ضعیف ندارند نیز به دنبال ناپایداری گذرا ممکن است دچار ناپایداری دینامیکی شوند به طوری که در شبکه قدرت ماشینی که در اولین نوسان از پایداری گذرا برخوردار بوده، تضمینی برای برگشت آن به

نقطه کار حالت دائمی وجود ندارد. در صورتی که این نوسانات میرا نشوند، باعث جدا شدن ماشین مذکور از شبکه می گردند. به طور کلی در شبکه‌هایی که دارای ساختار طولی هستند احتمال بروز نوسانات فرکانس پایین زیاد است.

۱-۲-۳- نوسانات داخلی

این پدیده از نوسانات دو یا چند ماشین سنکرون در یک نیروگاه به وجود می آید و فرکانس آن بین ۱/۵ تا ۳ هرتز است. منشا اصلی این نوسانات تاثیر متقابل سیستم‌های کنترلی موجود در نیروگاه است. وجود پایدارساز PSS می تواند موجب پایداری این نوسانات شود.

۱-۲-۴- نوسانات پیچشی و تشدید زیرسنکرون

این نوسانات از حرکت زاویه‌ای نسبی قسمت‌های دوار یک نیروگاه بوجود می آید که خطوط انتقال آن نیروگاه با خازن سری جبران سازی شده باشد. فرکانس این نوسانات بین ۴ تا ۶۰ هرتز است. ناپایداری‌هایی مانند SSR و نوسانات درون ناحیه‌ای به علت نزدیک شدن فرکانس دو مود مختلط به یکدیگر و تاثیر روی میزان میرایی آن‌ها و در نهایت ناپایداری یکی از آن‌ها رخ می دهد. با تحلیل تاثیر متقابل مودها در حالت بروز نوسانات می توان حساسیت مودها را به پارامترهای مختلف مشخص کرده و با تغییر این پارامترها برهم کنش مودها را به حداقل رساند و پایداری سیستم را تضمین نمود [۲]. اگر δ حداکثر فاصله بین دو مود بر روی محور حقیقی باشد با بررسی حساسیت δ به پارامترهای مختلف می توان مقدار δ را به یک مقدار حداقل رساند که در آن شرایط برهم کنش مودها حداقل بوده و سیستم پایدار باشد. این عمل در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

تشدید زیرسنکرون دو نوع است: ۱- تشدید قوی ۲- تشدید ضعیف

در تشدید قوی خطی سازی معادلات فضای حالت به یک ماتریس غیر قطری منجر می شود و