

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

خطی سازی سیستم توربین-ژنراتور و شبکه در نقطه کار و بررسی نوسانات زیر سنکرون

نگارش

جاهد مرادی

استاد راهنما

دکتر پیمان نادری

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق گرایش قدرت

بهمن ماه ۱۳۹۲

بسمه تعالی



تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب **جاهد مرادی** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی اثر متعلق به دانشگاه شهید رجایی می‌باشد.

امضاء

جاهد مرادی

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه /رساله

نام دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر

نام دانشجو: جاهد مرادی

عنوان پایان‌نامه: خطی‌سازی سیستم توربین-ژنراتور شبکه در نقطه کار و بررسی نوسانات

زیرسکرون

تاریخ دفاع:

رشته: مهندسی برق

گرایش: قدرت

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر نادری	استادیار	شهید رجایی تهران	
۲	استاد مشاور	دکتر کربلائی	استادیار	شهید رجایی تهران	
۳	استاد مدعو خارجی	دکتر رستگار	دانشیار	صنعتی امیرکبیر	
۴	استاد مدعو داخلی	دکتر موسوی	استادیار	شهید رجایی تهران	

تقدیم به:

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه
درخت پر بار وجودشان بیسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان
در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا
که این دو وجود مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی
زندگی پر از فراز و نشیب آموختندم...

تقدیم به " پدر و مادر " عزیزم

تشکر و قدردانی:

ستایش می‌کنم خداوند را که برآورنده‌ی عالم و آفریننده‌ی بنی آدم، که پادشاهی او را سزاست و فرمانروایی او را رواست .

"من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق"

بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاد محترم جناب آقای دکتر پیمان نادری که در طول انجام این پایان نامه از هیچ کوشش و تلاشی دریغ ننموده و همواره مشوق بنده بوده و بدون کمک و راهنمایی‌های ایشان انجام این پروژه غیر ممکن می‌نمود، صمیمانه قدردانی نمایم.

چکیده:

انرژی الکتریکی و نیاز روزافزون به آن یکی از ضروریات زندگی انسان در جامعه کنونی است. نیروگاه‌ها بایستی به صورت مستمر انرژی مورد نیاز مصرف کنندگان را تامین کنند. اکثر نیروگاه‌های انرژی مکانیکی مورد نیاز ژنراتور را از طریق توربین‌های بخار تامین می‌کنند. به دلایل اقتصادی این نیروگاه‌ها از توربین‌های بخار چند مرحله‌ای استفاده می‌شود. این نوع توربین‌ها دارای فرکانس‌های طبیعی، زیرسرعت سنکرون چرخش خود هستند. برای افزایش ظرفیت انتقال خطوط انتقال از جبران‌سازی سری استفاده می‌شود. تعامل بین سیستم الکتریکی و مکانیکی باعث بروز پدیده تشدید زیرسنکرون خواهد شد. در این پایان‌نامه یک مدل ریاضی جدید برای مدل‌سازی این پدیده ارائه شده است. بدین منظور سیستم مورد نظر در نقطه کار خطی سازی شده و بر روی مقادیر ویژه کل سیستم آنالیز مدال انجام گرفته شده است. هم‌چنین در این پژوهش تاثیر سیم-پیچ‌های میراساز ماشین سنکرون، که به صورت تابعی از پارامترهای خود ماشین بیان شده اند، بر روی پدیده مذکور بررسی شده است. در ادامه نیز از روش بنگ-بنگ کنترل راکتانس خط انتقال، جهت کاهش گشتاورهای پیچشی وارده بر قسمت‌های مختلف توربین، استفاده شده است. بیان کامل روابط ریاضی و مدل‌سازی کامل سیستم قدرت در فضای حالت و آنالیز کامل مدهای این سیستم از نقاط قوت این پایان‌نامه بوده و هم‌چنین برای آموزش این پدیده از طریق مدل‌سازی ریاضیاتی، بسیار مفید خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز مدال، خطی‌سازی، نوسانات زیرسنکرون، نوسانات پیچشی، نیروگاه متصل

به خط جبران‌شده، مدل‌سازی ریاضیاتی

فهرست مطالب

۱- فصل اول.....	۱
۱-۱- تشدید زیر سنکرون.....	۲
۲-۱- خود تحریکی یا تشدید زیرسنکرون حالت دائم.....	۴
۱-۲-۱- اثر ژنراتور القائی.....	۴
۲-۲-۱- تعامل پیچشی.....	۵
۳-۱- گشتاور گذرا یا تشدید زیرسنکرون گذرا.....	۵
۴-۱- ابزار های آنالیز تشدید زیرسنکرون.....	۶
۱-۴-۱- اسکن فرکانسی.....	۶
۲-۴-۱- آنالیز مقادیر ویژه سیستم.....	۷
۳-۴-۱- آنالیز گذرا.....	۸
۵-۱- مدل معیار اول IEEE.....	۸
۶-۱- آنالیز مدال.....	۱۰
۱-۶-۱- بردارهای ویژه.....	۱۱
۲-۶-۱- میزان مشارکت هر متغیر حالت در ایجاد مدها.....	۱۱
۲- فصل دوم.....	۱۳
۱-۲- مقدمه.....	۱۴
۲-۲- کاهش درصد جبران سازی.....	۱۴
۳-۲- فیلتر غیرفعال بلوکه کننده SSR در ژنراتور.....	۱۵
۴-۲- فیلتر غیرفعال SSR و خازن سری.....	۱۵
۵-۲- کنترل کننده تکمیلی SEDC.....	۱۶
۶-۲- رله حفاظت پیچشی.....	۱۶
۷-۲- خازن سری کنترلشونده تریستوری (TCSC).....	۱۷
۸-۲- استفاده از روش NGH.....	۲۱
۹-۲- روش بنگ-بنگ کنترل راکتانس خط انتقال.....	۲۲
۱۰-۲- ملاحظات طراحی سیستم.....	۲۴
۱-۱۰-۲- مقایسه جبران سازی سری و شنت.....	۲۴

۲۴	۲-۱۰-۲- اصلاح توربین-ژنراتور
۲۵	۳-۱۰-۳- اصلاح سیستم
۲۵	۴-۱۰-۴- حفاظت و تعبیه خازن سری
۲۷	۳- فصل سوم
۲۸	۱-۳- قاب مرجع مدلسازی
۲۸	۲-۳- مدل سازی ماشین سنکرون
۲۹	۱-۲-۳- معادلات شار های پیوندی
۳۰	۲-۲-۳- معادلات ولتاژ
۳۱	۳-۲-۳- معادلات گشتاور
۳۲	۴-۲-۳- تبدیل پارک
۳۳	۵-۲-۳- تبدیل فلوی پیوندی
۳۵	۶-۲-۳- تبدیل معادلات ولتاژ استاتور
۳۶	۷-۲-۳- معادله گشتاور در حوزه پارک
۳۷	۸-۲-۳- انتخاب ثابت های K_0 و K_d و K_q
۳۹	۹-۲-۳- کمیت ها در واحد پریونیت
۴۱	۳-۳- مدل سازی خط انتقال
۴۴	۴-۳- مدل سازی خازن جبران ساز سری
۴۶	۵-۳- مدل سازی شین بینهایت در انتهای خط
۴۷	۶-۳- معادلات حالت نهائی سیستم
۴۸	۷-۳- مدل سازی مجموعه توربین بخار
۵۰	۸-۳- اندوکتانس های ماشین سنکرون بر حسب پارامترهای ژنراتور
۵۳	۹-۳- مدل سازی پایدارساز سیستم قدرت و AVR
۵۵	۴- فصل چهارم
۵۶	۱-۴- مقادیر پارامترها جهت مدل سازی
۵۷	۲-۴- سیستم جبران سازی نشده
۵۷	۱-۲-۴- سیستم جبران نشده با ژنراتور بدون سیم پیچ میراساز
۵۹	۲-۲-۴- سیستم جبران نشده با ژنراتور دارای سیم پیچ میراساز

- ۳-۴- سیستم جبران سازی شده..... ۵۹
- ۱-۳-۴- سیستم جبران سازی شده بدون سیم پیچ میراساز..... ۶۰
- ۲-۳-۴- سیستم جبران سازی شده با سیم پیچ میراساز..... ۶۱
- ۴-۴- مدل سازی جبران سازی ۷۰٪..... ۶۲
- ۱-۴-۴- سیستم جبران شده بدون وجود سیم پیچ میراساز..... ۶۲
- ۲-۴-۴- سیستم جبران شده در حضور سیم پیچ میراساز..... ۶۳
- ۵-۴- مدل سازی پیوسته تغییرات درصد جبران سازی..... ۶۴
- ۶-۴- مدل سازی پیوسته تغییرات دور سیم پیچهای میراکننده..... ۶۷
- ۱-۶-۴- مدل سازی تغییرات پیوسته تعداد دور دمپر محور d..... ۷۱
- ۲-۶-۴- مدل سازی تغییرات پیوسته تعداد دور دمپر محور q..... ۷۳
- ۷-۴- مدل سازی پایدار ساز سیستم قدرت..... ۷۴
- ۸-۴- مدل سازی سیستم تحریک..... ۷۶
- ۹-۴- اعتبارسنجی و مقایسه نتایج..... ۷۸
- ۱۰-۴- روش بنگ-بنگ کنترل راکتانس خط انتقال..... ۸۰
- ۱-۱۰-۴- کنترل دامنه نوسانات تشدید زیرسنکرون، با کنترل نقطه کار سیستم..... ۸۱
- ۲-۱۰-۴- مدل سازی روش بنگ-بنگ کنترل راکتانس خط انتقال..... ۸۱
- ۵- فصل پنجم..... ۸۳
- ۱-۵- نتیجه گیری..... ۸۴
- ۲-۵- ارائه پیشنهاد برای تحقیقات آتی..... ۸۶
- ۶- پیوست..... ۸۷
- ۷- مراجع:..... ۸۹

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱- شماتیک یک سیستم متصل به شین بینهایت ۳
- شکل ۱-۲- شماتیک مدل معیار اول IEEE ۸
- شکل ۱-۳- شکل مربوط به مدهای سیستم مکانیکی ۹
- شکل ۱-۲- بلوک دیاگرام SEDC ۱۶
- شکل ۲-۲- منحنی P-V و شماتیک TCSC ۱۸
- شکل ۳-۲- شماتیک روش هینگورانی ۲۱
- شکل ۴-۲- منحنی P- δ ۲۲
- شکل ۵-۲- خاصیت مورد نیاز جبران ساز برای میرائی بیشتر نوسانات با توجه به تغییرات زاویه بار ماشین سنکرون ۲۳
- شکل ۶-۲- نحوه قرارگیری جبران سازها و بریکرهای مربوطه ۲۴
- شکل ۷-۲- شماتیک محافظت از خازن جبران ساز ۲۶
- شکل ۱-۳- ماشین سنکرون قطب برجسته ۲۸
- شکل ۲-۳- وضعیت قراردادی موتور و ژنراتور ۳۱
- شکل ۳-۳- ماشین سنکرون با سیم پیچی آرمیچر گردان ۳۵
- شکل ۴-۳- مدل تکفاز خط انتقال ۴۲
- شکل ۵-۳- اختلاف زاویه بین مولفه های ژنراتور و شبکه ۴۶
- شکل ۶-۳- شماتیک جرم و فنر توربین ۴۸
- شکل ۷-۳- I-امین سیستم جرم و فنر ۴۹
- شکل ۸-۳- شمای کلی مدل توربین چند جرم ۴۹
- شکل ۹-۳- شماتیک ماشین سنکرون ۵۱
- شکل ۱۰-۳- بلوک دیاگرام پایدار ساز سیستم قدرت به همراه AVR ۵۴
- شکل ۱-۴- تغییرات قسمت حقیقی مد سوم بر حسب تغییرات درصد جبران سازی ۶۴
- شکل ۲-۴- تغییرات قسمت حقیقی مد هشتم بر حسب تغییرات درصد جبران سازی ۶۵
- شکل ۳-۴- تغییرات قسمت موهومی مد سوم بر حسب تغییرات درصد جبران سازی ۶۶
- شکل ۴-۴- تغییرات قسمت موهومی مد هشتم بر حسب تغییرات جبران سازی ۶۶
- شکل ۵-۴- تغییرات قیمت موهومی مد اول بر حسب تغییرات جبران سازی ۶۷
- شکل ۶-۴- تغییرات قسمت حقیقی مد سوم بر حسب تغییرات تعداد دور سیم پیچهای میراساز ۶۷
- شکل ۷-۴- تغییرات قسمت حقیقی مد هشتم بر حسب تغییرات دور سیم پیچهای میراساز ۶۸
- شکل ۸-۴- تغییرات قسمت حقیقی مد اول بر حسب تغییرات دور سیم پیچهای میراساز ۶۹
- شکل ۹-۴- تغییرات قسمت موهومی مد اول نسبت به تغییرات تعداد دور دمپرها ۷۰
- شکل ۱۰-۴- تغییرات قسمت موهومی مد سوم بر حسب تغییرات دور سیم پیچ های میراساز ۷۰
- شکل ۱۱-۴- تغییرات قسمت موهومی مد هشتم بر حسب تغییرات دور سیم پیچ های میراساز ۷۱
- شکل ۱۲-۴- تغییرات قسمت حقیقی مد اول بر حسب تغییرات دور دمپر d ۷۱
- شکل ۱۳-۴- تغییرات قسمت موهومی مد سوم بر حسب تغییرات دور دمپر محور d ۷۲
- شکل ۱۴-۴- تغییرات قسمت حقیقی مد هشتم بر حسب تغییرات دور سیم پیچ میراساز محور d ۷۲
- شکل ۱۵-۴- تغییرات قسمت حقیقی مد اول بر حسب تغییرات تعداد دور سیم پیچ میراساز محور q ۷۳

- شکل ۴-۱۶- تغییرات قسمت حقیقی مد اول بر حسب تغییرات دور سیم پیچ میراساز محور q.....۷۴
- شکل ۴-۱۷- تغییرات قسمت حقیقی مد هشتم بر حسب تغییرات تعداد دور سیم پیچ میراساز محور q...۷۴
- شکل ۴-۱۸- گشتاور الکتریکی ژنراتور در اثر بروز اغتشاش در سیستم.....۷۸
- شکل ۴-۱۹- طیف فرکانسی گشتاور الکتریکی.....۷۹
- شکل ۴-۲۰- گشتاور الکتریکی ژنراتور.....۷۹
- شکل ۴-۲۱- طیف فرکانسی گشتاور الکتریکی ژنراتور بر اثر بروز اغتشاش متقارن.....۸۰
- شکل ۴-۲۲- نوسانات گشتاور وارده به ژنراتور و توربین ها.....۸۱
- شکل ۴-۲۳- نوسانات گشتاورهای وارده بر قسمت‌های مختلف توربین در حضور الگوریتم مفروض.....۸۲

فهرست جداول

۲۰	جدول ۱-۲- اطلاعات واحدهای نیروگاهی حفاظت شده در برابر تشدید زیرسنگرون
۳۹	جدول ۱-۳- کمیت ها و مقادیر مبنای ژنراتور
۵۶	جدول ۱-۴- مقادیر و واحد پارامترهای ژنراتور و خط انتقال
۵۷	جدول ۲-۴- مقادیر و واحد پارامترهای سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور
۵۸	جدول ۳-۴- مقادیر ویژه سیستم بدون جبران ساز و بدون سیم پیچ میراساز
۵۸	جدول ۴-۴- تاثیر متغیرهای حالت در ایجاد مدهای سیستم بدون جبران ساز
۵۹	جدول ۵-۴- مقادیر ویژه سیستم بدون جبران ساز سری در حضور میراساز
۵۹	جدول ۶-۴- میزان تاثیر ها متغیر حالت در ایجاد مدها در سیستم جبران نشده در حضور میراساز
۶۰	جدول ۷-۴- مقادیر ویژه سیستم با جبران ۳۰٪ و بدون دمپر
۶۰	جدول ۸-۴- تاثیر هر یک از متغیرهای حالت در ایجاد مدهای سیستم بدون دمپر
۶۱	جدول ۹-۴- مقادیر ویژه سیستم ۳۰٪ جبران شده با میراساز
۶۱	جدول ۱۰-۴- تاثیر هرمتغیر حالت در ایجاد مدها در سیستم جبران شده و با دمپر
۶۲	جدول ۱۱-۴- مقادیر ویژه سیستم ۷۰٪ جبران شده بدون میراساز
۶۲	جدول ۱۲-۴- تاثیر متغیرهای حالت در ایجاد هر مد در در جبران سازی ۷۰٪
۶۳	جدول ۱۳-۴- مقادیر ویژه سیستم به ازای جبرانسازی ۷۰٪
۶۳	جدول ۱۴-۴- میزان تاثیر هر یک از متغیرهای حالت در ایجاد مدها در جبرانسازی ۷۰٪
۷۵	جدول ۱۵-۴- مقادیر ویژه سیستم قدرت در حضور پایدارساز
۷۵	جدول ۱۶-۴- میزان تاثیر هر یک از متغیرهای حالت بر روی هر مد در حضور پایدارساز و رگولاتور
۷۶	جدول ۱۷-۴- مقادیر ویژه سیستم توربین چند جرمه بدون اکسایتر
۷۶	جدول ۱۸-۴- میزان تاثیر هر یک از متغیر های حالت توربین بر مدها
۷۷	جدول ۱۹-۴- مقادیر ویژه سیستم توربین با در نظرگیری سیستم اکسایتر
۷۷	جدول ۲۰-۴- میزان تاثیر زاویهها بر روی هر یک از مدهای سیستم چند جرمه
۸۰	جدول ۲۱-۴- مقایسه نتایج معادلات حالت و شبیه سازی Simulink

فهرست علائم اختصاری

ماتریس حالت سیستم	A_s	چگالی شار	B_r
ماتریس ورودی های سیستم	B	ماتریس پارک	C_p
اندوکتانس محور صفر	L_0	ضریب میرایی ماشین	D
توان نامی سه فاز	S	فرکانس پایه سیستم	F_0
مقاومت اهمی سیم پیچ استاتور	R_s	فرکانس رزونانس الکتریکی	F_e
ماتریس خروجی سیستم	Y	ماتریس واحد	I
انرژی	w	درصد جبران سازی خط انتقال	K_c
ثابت زمانی جبرانگر فاز	T_1, T_2	ضریب سختی جرم ها	K_i
ولتاژ تحریک	E_f	اندوکتانس خودی محور مستقیم	L_d
جریان فازی رتور	i_r	اندوکتانس نشستی محور مستقیم	L_{ld}
بهره پایدارساز سیستم قدرت	K_s	اندوکتانس خودی رتور	L_{rr}
اندوکتانس متقابل k, q	L_{qk}	اندوکتانس متقابل استاتور-رتور	L_{sr}
شبه انرژی (کو انرژی)	w'	اندوکتانس خودی استاتور	L_{ss}
نیروی محرکه مغناطیسی	MMF	ثابت اینرسی جرم ها	M
جریان فازی استاتور	i_s	تعداد دور سیم پیچ استاتور	N_s
ثابت زمانی رگولاتور ولتاژ	T_R	تعداد قطب های ماشین	P
اندوکتانس خودی محور عمودی	L_q	لغزش ماشین	S
اندوکتانس مبنا	L_B	گشتاور الکتریکی	T_e
اندوکتانس متقابل تحریک و محور d	L_{df}	طول فاصله هوایی ماشین	α_1, α_2
ولتاژ فازی پایانه ژنراتور	V_t	اختلاف زاویه ژنراتور و شبکه	δ
اندوکتانس نشستی محور عمودی	L_{lq}	زاویه الکتریکی ماشین	θ_e
ثابت زمانی صافی پایدارساز	T_w	ضریب نفوذپذیری مغناطیسی	μ
بهره رگولاتور ولتاژ	K_R	شار دور	Ψ
ولتاژ مرجع رگولاتور	V_{ref}	سرعت زاویه ای	ω
امپدانس مبنا	Z_B	ممان اینرسی	J

فصل اول

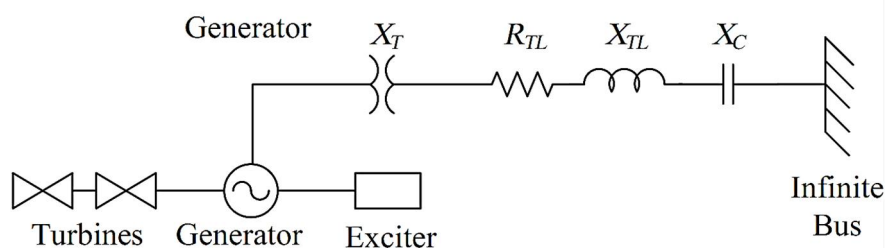
مقدمه ای بر تشدید زیر سنکرون

۱-۱- تشدید زیر سنکرون

تولید انرژی الکتریکی حاصل تعامل بین سیستم الکتریکی و مکانیکی از طریق طریق ژنراتور سنکرون می‌باشد. بدین جهت هرگونه تغییر در سیستم قدرت الکتریکی باعث واکنش سیستم مکانیکی خواهد شد و بالعکس. تغییر آهسته بار باعث تغییر آهسته گشتاور الکتریکی روی رتور می‌شود که به نوبه خود باعث تغییر زاویه رتور نسبت به استاتور و رسیدن به حالت پایدار جدید، همراه با تغییر و تنظیم گشتاور مکانیکی ورودی از طریق توربین‌ها، می‌شود. اغتشاشات بزرگ مثل خطاها و ونتایج حاصل از رفع خطا، باعث ایجاد گشتاور بزرگی بر روی سیستم مکانیکی، و گشتاور پیچشی گذرای بزرگی بر روی شفت کوپل کننده توربین‌ها و ژنراتور می‌شود [۱]. یک رتور نوعی، در یک سیستم توربین-ژنراتور بزرگ دارای چندین جسم دوار است. جرم‌های رتور و شفت‌ها تشکیل یک سیستم جرم-فنر می‌دهند که دارای مدهای ذاتی پیچشی فرکانس طبیعی است که همه آنها زیر فرکانس سنکرون هستند [۲].

یک سیستم m جرم-فنره دارای $m-1$ مد نوسانات پیچشی است و دارای یک مد صفر نیز می‌باشد که به‌ازای آن، تمامی جرم‌ها بطور هم‌نوا بدون چرخش محور (نوسان در جهت مخالف) با همدیگر نوسان می‌کنند. مد ۱، یک پیچش محوری و مد ۲، دو پیچش محوری و ... دارد. شکل مد‌ها از روی بردارهای ویژه سمت راست که از مقادیر ویژه جرم-فنر حاصل می‌شود، قابل محاسبه هستند. فرکانس‌های نوسانی در حقیقت بخش موهومی مقادیر ویژه سیستم جرم-فنر می‌باشند [۳]. میرائی مکانیکی نوسانات پیچشی همواره پائین، اما مثبت است؛ که عمدتاً بدلیل اصطکاک، تلفات باد و شارش بخار یا گاز است. میرائی مکانیکی با افزایش بار افزایش یافته و از سیستم الکتریکی تاثیر نمی‌پذیرد. نوسانات پیچشی به آرامی با ثابت زمانی در حدود ۱۰ ثانیه میرا می‌شوند [۱]. میرائی مکانیکی زمانی کمینه است که توربین ژنراتور در حالت بی‌باری باشد و با افزایش بار میرائی نیز بیشتر خواهد شد. میرائی بی‌باری اندازه‌گیری شده برای یک توربین ژنراتور نوعی در حدود ۰,۰۲ تا ۰,۰۵ (S^{-1}) است. این میرائی بدلیل کم‌بودن شارش بخار در داخل توربین، کوچک است. میرائی در حالت بار کامل در حدود ۰,۲ است. میرائی توربین‌های گازی بیشتر از توربین‌های بخار است. بین توربین‌های آبی و سیستم الکتریکی هیچ موردی از تشدید زیرسنکرون گزارش نشده است و

این بدلیل اینرسی بالای هیدروژنراتور نسبت به توربین آبی است (معمولا ۱۰ تا ۴۰ برابر بزرگتر) که منجر به کم شدن شکل مد^۱ها می‌شود، بدین معناست که ژنراتور در فرکانس‌های پیچشی تعاملی با شبکه ندارد. یک سیستم انتقال جبران‌سازی نشده، در محدوده فرکانس‌های زیر سنکرون دارای میرایی منفی می‌باشد. اضافه کردن خازن جبران‌سازی سری باعث منفی شدن میرایی در محدوده فرکانسی زیرسنکرون خواهد شد. تعامل پیچشی با اثر میرایی منفی، باعث رشد نمایی نوسانات شده و اگر در فرکانسی، نزدیک به فرکانس پایه سیستم باشد، منجر به آسیب جدی به شفت خواهد شد. از آنجا که سیستم توربین ژنراتور به صورت شعاعی از طریق خط جبران‌سازی شده، به سیستم قدرت متصل است هر اغتشاشی می‌تواند باعث نوسان توربین در یک یا چندین مد، از نوسانات پیچشی شود. این نوسان پیچشی می‌تواند باعث تولید گشتاور بزرگی که ممکن است چندین برابر گشتاور نامی باشد، شود لذا آسیب جدی به شفت وارد خواهد شد. یک سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت از طریق خط جبران شده، در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- شماتیک یک سیستم متصل به شین بی‌نهایت

سیستم فوق دارای فرکانس تشدید به شرح زیر است:

$$f_e = f_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_G'' + X_{TL} + X_T}} \quad (1-1)$$

که در رابطه ۱-۱، f_0 فرکانس پایه سیستم و X_G'' راکتانس زیرگذرای ژنراتور و X_{TL} راکتانی نشتی ترانسفورماتور قدرت و X_T راکتانس خط و X_c راکتانس خازن سری است. درجه جبران‌سازی را با $K = \frac{X_c}{X_T}$ نشان می‌دهند و معمولا X_c می‌تواند تا ۶۰-۷۰٪ X_T باشد (همیشه کوچکتر است).

¹ - Low Mode Shape

احتمال زیادی دارد که فرکانس تشدید الکتریکی خیلی نزدیک به یکی از فرکانس‌های نوسانات پیچشی توربین باشد و باعث تحریک نوسانات پیچشی شود. در چنین شرایطی میراثی سیستم منفی می‌شود و تشدید زیرسنکرون ممکن است از اغتشاشات خیلی کوچک بوجود آید. برای جلوگیری از این مشکل می‌توان درصد جبران‌سازی را طوری انتخاب کرد که نزدیک فرکانس طبیعی نوسانات پیچشی نباشد که بسیار مشکل است و بستگی به شرایط و برنامه ریزی سیستم قدرت دارد.

دو نوع تعامل تشدید زیر سنکرونی موجود است [۴-۵].

۱-۲- خود تحریکی یا تشدید زیرسنکرون حالت دائم

جریان‌های زیرسنکرونی که به ژنراتور وارد می‌شوند، باعث تولید مولفه ولتاژ با فرکانس زیر سنکرون در پایانه های ژنراتور می‌شوند. این مولفه ولتاژ ممکن است به تولید جریان و خود تحریکی منجر شود.

دو نوع خود تحریکی موجود است:

۱-۲-۱- اثر ژنراتور القایی

تشدید الکتریکی که به دلیل جبران‌سازی خط انتقال با خازن سری رخ می‌دهد، یک میدان دوار با سرعت سنکرون متناسب با فرکانس تشدید، را در داخل استاتور ژنراتور سنکرون ایجاد می‌کند. برای خطوط با جبران‌سازی های بالا، فرکانس تشدید کمتر از فرکانس پایه سیستم خواهد شد. جریان های مربوط به تشدید یک میدان دوار با سرعت کمتر از سنکرون در ژنراتور ایجاد خواهد کرد چون رتور با سرعت سنکرون می‌چرخد در این شرایط ژنراتور سنکرون رفتاری مثل ژنراتور القایی خواهد داشت. لغزش ماشین القایی از رابطه ۱-۲ محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{f_e - f_0}{f_e} < 0 \quad (1-2)$$

لغزش منفی است و مقاومت معادل دیده شده از دید آرمیچر منفی است و هنگامی که این مقدار مقاومت منفی از مجموع مقاومت های شبکه و آرمیچر در فرکانس تشدید، بیشتر باشد وقوع خودتحریکی حتمی است.

۱-۲-۲- تعامل پیچشی

پیچش متقابل شامل هر دوی سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی می‌شود. وقتی فرکانس مولفه زیرسنکرون ولتاژ آرمیچر نزدیک یا روی فرکانس طبیعی سیستم الکتریکی باشد، جریان زیرسنکرون منتهی به باعث تولید گشتاور در رتور شده که باعث نوسانات رتور می‌شود. نوسانات در فرکانس‌های پیچشی ممکن است باعث تقویت گشتاور و احتمالاً منجر به شکستن شفت خواهد شد. این اثر متقابل بین سیستم الکتریکی و مکانیکی با نام پیچش متقابل شناخته می‌شود. فرکانس نوسانات تعامل پیچشی رتور ژنراتور " f_m " باعث القا ولتاژ در آرمیچر با مولفه فرکانسی $f_{em} = f_0 \pm f_m$ خواهد شد. هنگامی که مولفه فرکانس زیرسنکرون f_{em} منطبق یا خیلی نزدیک به فرکانس تشدید الکتریکی f_e باشد، تعامل پیچشی و تشدید الکتریکی متقابلاً همدیگر را تحریک کرده و تشدید زیرسنکرون رخ خواهد داد. در چنین شرایطی تشدید الکتریکی برای تعامل پیچشی مانند میرائی منفی عمل می‌کند و تعامل پیچشی برای تشدید الکتریکی مانند مقاومت الکتریکی منفی عمل می‌کند [۶].

۱-۳- گشتاور گذرا یا تشدید زیرسنکرون گذرا

گشتاور گذرا، گشتاورهایی هستند که ناشی از اغتشاش در سیستم اند. اغتشاشات سیستم باعث تغییر ناگهانی در شبکه می‌شود که آن هم منجر به تغییر ناگهانی جریان می‌شود که متمایل به نوسان در فرکانسهای طبیعی است. در خطوط انتقال بدون جبران‌سازی این جریانات با ثابت زمانی که با نسبت اندوکتانس به مقاومت خط مرتبط است، به صفر میرا می‌شود. برای خطوط جبران‌سازی شده با خازن سری، گشتاور الکتریکی گذرا شامل چندین مولفه یک طرفه، نمایی میراشونده و نوسانی از زیرسنکرون تا مولفه هارمونیک دوم است. هنگام وقوع تشدید زیرسنکرون مولفه

فرکانسی زیر سنکرون گشتاور، دارای دامنه بسیار بزرگی پس از وقوع اغتشاشات بزرگ است اگرچه ممکن است در نهایت از بین برود [۷].

چنین دامنه بزرگی از گشتاور زیرسنکرون باعث کاهش طول عمر شفت خواهد شد. این حالت فقط در صورت بروز خطای سه فاز به زمین، رخ می‌دهد.

۱-۴- ابزار های آنالیز تشدید زیرسنکرون

پدیده تشدید زیرسنکرون شامل تبادل بین سیستم الکتریکی و مکانیکی است. بنابراین ارائه مدلی دقیق و با جزئیات کامل برای هر دو، دینامیک الکترومکانیکی^۱ واحد تولیدی و دینامیک الکترومغناطیسی^۲ شبکه انتقال، برای آنالیز تشدید زیرسنکرون لازم است. چندین روش برای مطالعه تشدید زیرسنکرون در سیستم قدرت، موجود است. ۳ تکنیک متداول وجود دارد:

- ۱- بررسی (اسکن) فرکانسی^۳
- ۲- آنالیز مقادیر ویژه
- ۳- شبیه سازی گذرا الکترومغناطیسی^۴

۱-۴-۱- اسکن فرکانسی

بررسی فرکانسی یک تکنیک پایه ای برای آنالیز مقدماتی تشدید زیرسنکرون است. که شامل محاسبه نقطه تحریک امپدانس در رنج فرکانسی مناسب از دید باس ژنراتور تحت مطالعه است. در این تکنیک مقاومت و راکتانس معادل از دید ژنراتوری مشخص نسبت به شبکه، به صورت تابعی از فرکانس محاسبه می‌شود. باید فرکانسی موجود باشد که در آن راکتانس کل صفر بوده و مقاومت منفی است، فرکانس‌هایی که انتظار اثر ژنراتور القایی می‌رود. تحلیل فرکانسی می‌تواند گاهی اوقات اطلاعاتی در مورد، مشکلات احتمالی با پیچش متقابل و گشتاورهای گذرا، فراهم آورد. این روش

¹ -Electromechanical Dynamics

² -Electromagnetics Dynamics

³ -Frequency Scanning

⁴ -Electromagnetic Transient Simulation