



دانشکده مهندسی
گروه برق

پایان نامه کارشناسی
مهندسی برق قدرت

عنوان :

مطالعه و شبیه سازی پدیده نوسانات زیر سنکرون (SSR) در سیستم های قدرت

استاد راهنما:

دکتر عباس ربیعی

نگارش:

علی عبداللهی ارجنکی

شهریور ۹۶

تقدیم

به او که بی مددش نه نای رفتن بود و نه توان آموختن

به تیکه گاهم، پدرم

به مهربانم، مادرم

همچنین به استادان فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند
که رهنمود هایشان روشنی بخش راهم بود.

تقدیر و تشکر:

بر خود لازم میدانم که از زحمات فراوان استاد گرانقدر جناب آقای دکتر عباس ربیعی که با همراهی و راهنمایی خویش مرا در انجام این پایان نامه یاری رساندند، صمیمانه تشکر نمایم و نیز به خاطر تمام اموخته هایم از ایشان سپاسگذارم

چکیده

جبران سازی خطوط انتقال به خصوص هنگامی که توان زیادی در طول خط بایستی منتقل گردد یکی از مهم ترین راه ها برای بهبود قابلیت انتقال توان است. اما هنگامی که خط جبران سازی شده مرتبط با یک ژنراتور و توربین بخار باشد می تواند منجر به ایجاد پدیده نوسانات زیر سنکرون گردد این پدیده به دلیل تقابل بین مود های نوسانی الکتریکی خازن جبران ساز شبکه و مود های نوسانی مکانیکی بین مجموعه ژنراتور و توربین به وجود می آید که می تواند باعث آسیب دیدن شفت گردد پدیده تشدید زیر سنکرون به طور عمده در سیستم های انتقال جبران شده با خازن سری رخ می دهد.

در این پروژه بنا داریم که پدیده نوسانات زیر سنکرون را در یک سیستم قدرت نمونه مطالعه نماییم و با استفاده از شبیه سازی دلایل وقوع این پدیده و اثرات آن را بر عملکرد شبکه بررسی نماییم.

واژه نامه

Sub synchronous resonance	پدیده نوسانات زیر سنکرون
synchronization	همزمانی
steady state stability	پایداری حالت ماندگار
exciter	سیستم تحریک
transient stability	پایداری گذرا
dynamic stability	پایداری دینامیکی
torsional modes	مود های پیچشی
torsional oscillations	نوسانات پیچشی
stiffness	ضریب سختی
scanning	مرور
complementary	مکمل
shunt compensated	جبران شده
super synchronous	فوق سنکرون
Navajo plant	نیروگاه ناواجو
salt river project	پروژه سالت ریور
EMTP	برنامه گذراهای الکترومغناطیسی
eigenvectors	بردار های ویژه
right hand eigenvectors	بردارهای ویژه دست راست
left hand eigenvectors	بردارهای ویژه دست چپ
Argonne national laboratory	آزمایشگاه ملی آرگون
Bonneville	بون ویل
torsional dynamics	دینامیک پیچشی

First bench mark case	FBS
LFO	نوسانات فرکانس پایین
PSS	پایدار ساز سیستم قدرت
damping	میرایی
Transfer function	تابع تبدیل
fault	خطا
Multi mass	چند جرمه
Characteristic equations	معادله مشخصه

فهرست مطالب

۱.....	مقدمه ای بر پدیده نوسانات زیر سنکرون.....
۲.....	۱-۱ مقدمه.....
۲.....	۲-۱ پایداری حالت ماندگار.....
۳.....	۳-۱ پایداری گذرا.....
۳.....	۴-۱ پایداری دینامیکی.....
۴.....	۵-۱ نوسانات پیچشی.....
۶.....	۶-۱ تشدید زیر سنکرون.....
۱۱.....	۷-۱ شرایط وقوع پدیده تشدید زیر سنکرون.....
۱۲.....	۸-۱ خود تحریک ناشی از اثر ژنراتور القایی.....
۱۴.....	۹-۱ تداخل پیچشی منجر به نوسانات زیر سنکرون.....
۱۵.....	۱۰-۱ تقویت گشتاور گذرا.....
۱۶.....	۱۱-۱ روشهای تحلیلی.....
۱۷.....	۱-۱۱-۱ تحلیل مقدار ویژه(مدال).....
۱۸.....	۱-۱-۱۱-۱ مزایای استفاده از محاسبه مقادیر ویژه.....
۱۹.....	۲-۱-۱۱-۱ معایب محاسبه مقادیر ویژه.....
۲۰.....	۲-۱۱-۱ مرور فرکانسی.....
۲۲.....	۳-۱۱-۱ تحلیل پاسخ فرکانسی سیستم کامل.....
۲۲.....	۴-۱۱-۱ تحلیل حوزه فرکانسی تقریبی.....
۲۲.....	۵-۱۱-۱ تحلیل حوزه زمان.....
۲۳.....	۱۲-۱ راه های برخورد با مساله نوسانات زیر سنکرون.....
۲۳.....	۱۳-۱ روش های مقابله با پدیده نوسانات زیر سنکرون.....
۲۳.....	۱-۱۳-۱ فیلتر استاتیکی.....
۲۴.....	۲-۱۳-۱ فیلتر دینامیکی.....
۲۴.....	۳-۱۳-۱ پایدار ساز دینامیکی.....
۲۴.....	۴-۱۳-۱ میرا کننده سیستم تحریک.....
۲۴.....	۵-۱۳-۱ رله های حفاظتی.....
۲۴.....	۶-۱۳-۱ طرح NGH.....
۲۵.....	۱۴-۱ مشخصه های پیچشی ژنراتور آبی.....

۲۶.....	مدلسازی پدیده نوسانات زیر سنکرون.....
۲۷.....	۱-۲ مدلسازی نوسانات پیچشی در یک توربین بخار.....
۳۰.....	۲-۲ نحوه محاسبه فرکانس نوسانات پیچشی و نحوه توزیع آن در یک روتور.....
۳۵.....	۳-۲ بررسی یک مثال عددی.....
۳۹.....	۴-۲ تداخل نوسانات پیچشی توربین بخار با قسمت های دیگر.....
۴۰.....	۵-۲ تداخل نوسانات پیچشی با خازن سری.....
۴۱.....	۴-۲ بررسی فرکانس تشدید یک خط انتقال جبران شده.....
۴۳.....	شبیه سازی پدیده نوسانات زیر سنکرون در محیط PSCAD.....
۴۴.....	۱-۳ شبکه مورد مطالعه.....
۴۴.....	۲-۳ نرم افزار PSCAD.....
۴۵.....	۳-۳ بلوک های مورد استفاده در شبیه سازی.....
۴۵.....	۱-۳-۳ بلوک ژنراتور سنکرون.....
۴۵.....	۲-۳-۳ بلوک توربین.....
۴۶.....	۳-۳-۳ بلوک ترانسفورماتور.....
۴۶.....	۴-۳-۳ بلوکهای امیدانس.....
۴۶.....	۵-۳-۳ بلوک خطا.....
۴۷.....	۶-۳-۳ بلوک باس بینهایت.....
۴۷.....	۴-۳ شبیه سازی SSR با خازن سری در حدود ۲۰ میکروفاراد.....
۴۸.....	نتایج شبیه سازی.....
۵۳.....	نتایج شبیه سازی با خازن سری در حدود ۶۰ میکروفاراد.....
۵۷.....	نتایج شبیه سازی بدون خازن سری.....
۶۱.....	نتیجه گیری.....
۶۲.....	فهرست مراجع.....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ نمایش یک روتور صلب ساده ۴
- شکل ۱-۲ نمایش یک روتور قابل انعطاف ۵
- شکل ۱-۳ نمایش تک خطی خط انتقال جبران شده با خازن سری ۷
- شکل ۱-۴ مدار معادل ساده برای محاسبه شکل منحنی جریان در صورت اتصال کوتاه ۷
- شکل ۱-۵ مدار معادل ساده شده ماشین سنکرون قابل اعمال به کمیت های فرکانسی زیر سنکرون ۱۲
- شکل ۱-۶ مدار معادل یک ژنراتور آسنکرون با صرف نظر از X_m ۱۳
- شکل ۱-۷ مدار معادل یک ژنراتور آسنکرون ۱۳
- شکل ۱-۸ مقادیر ویژه محاسبه شده برای مدل FBM ۱۸
- شکل ۱-۹ شکل نتایج حاصل از مرور فرکانسی از یک شبکه ۲۱
- شکل ۲-۱ قسمت های مختلف یک روتور در یک نیروگاه بخار ۲۸
- شکل ۲-۲ نحوه توزیع یک نوسان پیچشی روی روتور یک توربین بخار ۳۴
- شکل ۲-۳ دامنه نوسانات فرکانس های پیچشی روی قسمت های مختلف توربین در مد پنج ۳۸
- شکل ۲-۴ دامنه نوسانات فرکانس های پیچشی روی قسمت های مختلف توربین در مد چهار ۳۸
- شکل ۲-۵ دامنه نوسانات فرکانس های پیچشی روی قسمت های مختلف توربین در مد سه ۳۸
- شکل ۲-۶ دامنه نوسانات فرکانس های پیچشی روی قسمت های مختلف توربین در مد یک ۳۹
- شکل ۲-۷ دامنه نوسانات فرکانس های پیچشی روی قسمت های مختلف توربین در مد دو ۳۹
- شکل ۲-۸ نحوه قرار گرفتن خازن سری در یک خط انتقال ۴۱
- شکل ۳-۱ شبکه در نظر گرفته شده برای مطالعات تشدید زیر سنکرون ۴۴
- شکل ۳-۲ بلوک ژنراتور سنکرون ۴۵
- شکل ۳-۳ بلوک توربین ۴۵
- شکل ۳-۴ بلوک ترانسفورماتور ۴۶
- شکل ۳-۵ بلوک های امپدانس ۴۶

شکل ۳-۶	بلوک خطا	۴۶
شکل ۳-۷	بلوک باس بینهایت	۴۷
شکل ۳-۸	شماتیک سیستم در محیط PSCAD	۴۷
شکل ۳-۹	شکل موج ولتاژ خروجی ماشین و ولتاژ دوسر خازن سری	۴۸
شکل ۳-۱۰	شکل موج گشتاور خروجی بر روی قسمت های مختلف روتور	۴۹
شکل ۳-۱۱	شکل موج خروجی توان اکتیو، راکتیو، جریان	۵۰
شکل ۳-۱۲	شکل موج های خروجی زاویه بار و زاویه مکانیکی روتور	۵۱
شکل ۳-۱۳	سرعت خروجی جرم های مختلف روتور در حالت SSR	۵۲
شکل ۳-۱۴	شکل موج ولتاژ خروجی ماشین و ولتاژ دوسر خازن سری	۵۳
شکل ۳-۱۵	شکل موج گشتاور خروجی بر روی قسمت های مختلف روتور	۵۴
شکل ۳-۱۶	شکل موج خروجی توان اکتیو، راکتیو، جریان	۵۵
شکل ۳-۱۷	شکل موج های خروجی زاویه بار و زاویه مکانیکی روتور	۵۶
شکل ۳-۱۸	ولتاژ خروجی ماشین در حالت بدون خازن سری	۵۷
شکل ۳-۱۹	جریان، توان راکتیو و توان اکتیو خروجی ماشین	۵۸
شکل ۳-۲۰	زاویه بار و فاز ماشین و گشتاور الکترومکانیکی خروجی	۵۹

فصل اول

مقدمه ای بر پدیده نوسانات زیر سنکرون

۱-۱ مقدمه

کاربرد خازن سری در شبکه های انتقال قدرت به منظور افزایش قدرت قابل انتقال استفاده می شود در شبکه هایی که از خطوط انتقال طویل استفاده می شود با استفاده از خازن سری در بین خط می توان راکتانس معادل خط را پایین آورد و چون توان انتقالی با عکس راکتانس خط ارتباط دارد توان انتقالی افزایش می یابد ولی قرار دادن خازن سری باعث پیش آمدن مسئله ای به نام تشدید زیر سنکرون می شود این پدیده باعث شکستن شفت ژنراتور می شود و باعث می شود که نیروگاه از مدار خارج گردد.

آشنایی با این پدیده زمانی رخ داد که برای اولین بار محور های نیروگاه حرارتی Mohave در ایالت نوادای آمریکا شکسته شد و از آن به بعد مسئله مد نظر قرار گرفته شد.

پس از مطالعه این پدیده مشخص شد که نیروگاه های بخاری که دارای اجرام دوار متعدد می باشند مستعد ترین نیروگاه برای این پدیده می باشند.

انواع و اقسام پیشنهاد ها برای برطرف نمودن این مسئله ارائه شد. یک از این راه کارها استفاده از جبران ساز به همراه کنترل مخصوص به آن می باشد.

این مسئله شایان ذکر می باشد که خوشبختانه در ایران مسئله نوسانات زیر سنکرون مطرح نیست. زیرا خطوط انتقال ما زیاد طویل نیستند و بالطبع از خازن سری استفاده نشده است.

امروزه با گسترش شبکه های قدرت، مسئله پایداری سیستم قدرت از اهمیت ویژه ای برخوردار شده است. یک سیستم قدرت، پایدار گفته می شود هرگاه ژنراتور سنکرون سیستم به هنگام بروز اختلال، همزمانی خود را با شبکه حفظ نماید. با توجه به نوع اختلال سه تعریف از پایداری در سیستم های قدرت ارائه می شود که در ادامه شرح داده می شوند:

۲-۱ پایداری حالت ماندگار

هرگاه ژنراتورهای سیستم قدرت در برابر تغییرات کوچک بین تولید و مصرف انرژی الکتریکی همزمانی خود را حفظ کنند، گویند سیستم پایدار حالت ماندگار است. افزایش پایداری حالت ماندگار توسط گاورنر و سیستم تحریک قابل تحقق می باشد، در مطالعات این نوع پایداری ژنراتور سنکرون به وسیله توابع جبری مدل می شود.

۳-۱ پایداری گذرا

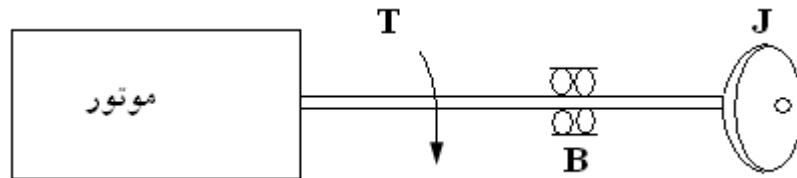
هرگاه در سیستم قدرت اختلالات شدیدی (نظیر اتصال کوتاه، خروج بار، خروج ژنراتور، . . .) رخ دهند سرعت ماشین ها، قدرت الکتریکی خطوط انتقال و زاویه بار ماشین ها تغییرات شدیدی دارند. اگر بعد از بروز اینگونه اختلالات، شبکه همزمانی خود را حفظ کند گوئیم سیستم قدرت پایداری گذرا دارد. در مطالعات گذرا از مدل های غیرخطی و مرتبه بالای ماشین سنکرون استفاده می شود.

۴-۱ پایداری دینامیکی

هرگاه پایداری سیستم قدرت در برابر اغتشاشات کوچک و آنی (تغییری کوچک در ولتاژ میدان ژنراتور) حفظ شود، سیستم قدرت را پایدار دینامیکی گوئیم. تا قبل از سال ۱۹۶۴ میلادی در مطالعات سیستم قدرت تصور می شد که اگر سیستم شرایط پایداری گذرا را داشته باشد از نظر دینامیکی حتماً پایدار است. اما به هنگام اتصال شبکه های شمال غربی و جنوب غربی آمریکا در سال ۱۹۶۴ خلاف این گفته ثابت شد. در این شبکه پس از اختلال نوساناتی با فرکانس کم و میرایی ضعیف به وجود می آمد که برای مدت زمان طولانی ادامه می یافت. به دنبال این رخداد بود که مطالعات پایداری دینامیکی به طور مستقل شروع شد و تحقیقات گسترده ای در این مقوله صورت گرفت و سرانجام پایین بودن مقدار میرایی مولد الکترومکانیکی ماشین های سنکرون شبکه، عامل ایجاد این نوسانات شناخته شدند، پس از آن پایداری به دو دسته پایداری سیگنال کوچک و پایداری سیگنال بزرگ تقسیم بندی شد. **مودهای پیچشی** که مربوط به اجزای چرخان روی محور توربین ژنراتور است. ناپایداری این مودها ممکن است به علت تاثیر متقابل اجزای مذکور با سیستم تحریک، کنترل کننده های HVDC و خطوط انتقالی که با خازنهای سری جبران شده اند، اتفاق افتد. در حالت خاصی ممکن است نوسانهای پیچشی در گستره زیر سنکرون، با سیستم الکتریکی به شدت تداخل کنند [۳].

۵-۱ نوسانات پیچشی

این بحث را با یک مثال از روتور صلب ساده (شکل ۱-۱) شروع می‌کنیم.



شکل ۱-۱ نمایش یک روتور صلب ساده

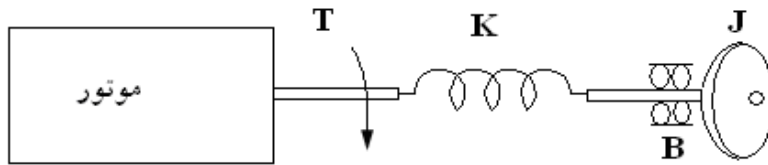
می‌دانیم اگر به یک محور (روتور) گشتاور T اعمال شود:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (1-1)$$

که در این رابطه J اینرسی روتور، B ضریب اصطکاک چرخشی و ω سرعت زاویه‌ای گردش روتور است. در اینجا T گشتاور معادل اعمالی است یعنی $T = T_m - T_e$ تفاضل گشتاور اعمالی از طرف توربین و گشتاور مقاوم از طرف ماشین سنکرون می‌باشد.

این رابطه در صورتی صحیح است که روتور یک جسم کاملاً صلب باشد. یعنی این واقعیت که گشتاور مکانیکی از طرف توربین در یک نقطه از محور روتور و گشتاور الکتریکی از طرف ماشین سنکرون در یک نقطه دیگر به روتور اعمال می‌شود، تفاوتی در نتیجه کار نمی‌دهد، زیرا در یک جسم صلب تفاوتی نمی‌کند که گشتاور به چه نقطه‌ای از محور اعمال شود.

اگر فرض شود که روتور شکل (۱-۱) کمی انعطاف پذیر باشد، به عبارت دیگر مثلاً فرض شود اگر گشتاور مکانیکی به یک سر روتور و گشتاور الکتریکی در سر دیگر اعمال شود، دو سر روتور نسبت به هم اختلاف زاویه پیدا می‌کنند، در آن صورت شکل (۱-۱) باید به شکل (۱-۲) اصلاح شود. در این حالت برای روتور قابلیت انعطاف فرض شده است (این قابلیت بصورت شماتیک به شکل یک فنر چرخشی نمایش داده شده است).



شکل ۱-۲ نمایش یک روتور قابل انعطاف

در حالیکه روتور قابلیت انعطاف دارد معادله دینامیکی بصورت زیر است:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + K\Delta\theta \quad (۲-۱)$$

در این رابطه K ضریب سختی و $\Delta\theta$ اختلاف زاویه دو سر روتور است. مقدار ضریب سختی به جنس روتور و شکل آن بستگی دارد و برای هر روتور، بسته به جنس و شکل آن و فرمول ها و نرم افزارهای مربوطه، می توان مقدار آن را محاسبه نمود.

مدلسازی دقیق روتور توربین ها، که ضریب سختی برایش تعریف شده است، باید گسترده باشد (مانند مدل گسترده خطوط انتقال)، ولی اگر دقت فدای سادگی مدل شود، فرض می شود که کل اینرسی J از دو قسمت J_1 و J_2 تشکیل شده است که با یک فنر چرخشی با ضریب سختی K به هم متصل شده اند. این فرض کاملاً شبیه فرضی است که در مدلسازی خطوط انتقال انجام می دهند. در مدلسازی خطوط انتقال فرض می شود که خاصیت خازنی خط بصورت فشرده در دو طرف خط انتقال قرار دارد. در این صورت با فرض اینکه به یک طرف روتور توربین گشتاور مکانیکی و به طرف دیگر گشتاور الکتریکی اعمال شود:

$$T_m = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + B\omega_1 + K(\theta_1 - \theta_2) \quad (۳-۱)$$

$$-T_e = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + B\omega_2 + K(\theta_2 - \theta_1) \quad (۴-۱)$$

در این رابطه θ_1 و ω_1 به ترتیب زاویه و سرعت زاویه ای قسمت اول روتور و θ_2 و ω_2 زاویه و سرعت زاویه ای قسمت دوم روتور هستند. اگر ω_2 سرعت مبنا فرض شود، $\omega = \omega_2 - \omega_1$ که همان سرعت زاویه ای نسبی این دو قسمت نسبت به یکدیگر است را اصطلاحاً نوسانات پیچشی می نامند که نوساناتی است که یک قسمت از روتور نسبت به قسمت های دیگر انجام

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

نتیجه گیری

در این پروژه ابتدا پدیده نوسانات زیر سنکرون معرفی شد و دلایل و شرایط وقوع آن بررسی شد همچنین روش های مقابله و روش های تحلیل و مزایا و معایب هرکدام نیز گفته شد سپس مدل جرم و فنر برای روتور های طویل نیروگاههای بخار مطرح شد و با استفاده از آن فرکانس نوسانات پیچشی که نوسانات قسمتهای مختلف روتور نسبت به همدیگر می باشد محاسبه شد و نحوه توزیع دامنه این نوسانات در طول روتور بدست آمد. تداخل نوسانات پیچشی با خازن سری خطوط انتقال جبران شده که باعث پدیده تشدید زیر سنکرون می گردد مورد بحث قرار گرفت و شبکه تست ارائه شده در حالت های مختلف (با خازن سری، بدون خازن سری) برای مطالعه این پدیده با استفاده از نرم افزار PSCAD مورد شبیه سازی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از نرم افزار نشان داد که این پدیده می تواند باعث ناپایداری و نوسانی شدن سیستم گردد و باید یک سری کنترلر هایی به منظور کنترل این نوسانات و جلوگیری از اثرات مخرب آن بر روی شبکه قدرت طراحی نمود که از موضوع این پروژه خارج می باشد.

فهرست مراجع

- [۱] مهدی کراری, دینامیک و کنترل سیستم های قدرت, تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر, ۱۳۸۲.
- [۲] یان ماچوفسکی, یانوش بیالک و جیمز ریچارد بامبی, دینامیک و پایداری سیستم های قدرت, تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت, ۱۳۸۴.
- [۳] محمدرضا سهیلی; محمد رضایی; علی وکیلان; معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات ارتش جمهوری اسلامی ایران, “بررسی و آنالیز نوسانات زیر سنکرون و پدیده تشدید زیر سنکرون در سیستم قدرت”, در اولین کنفرانس ملی مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی, ۱۳۹۳.
- [۴] **p. kundur, Power System Stability And Control, McGraw-Hill p. 1176. Education, 1994,**
- [۵] **J.E. Van Ness, و P.M. Anderson, B.L. Agrawal
Subsynchronous resonance in power systems, New York:
IEEE PRESS, 1990.**