

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مهندسی برق و رباتیک

گروه: قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

مکان یابی جبران کننده استاتیک توان راکتیو در سیستم قدرت به منظور بهبود

سطح پایداری ولتاژ با استفاده از تکنیک فرم نرمال

محمد اسکندری نسب

استاد راهنما:

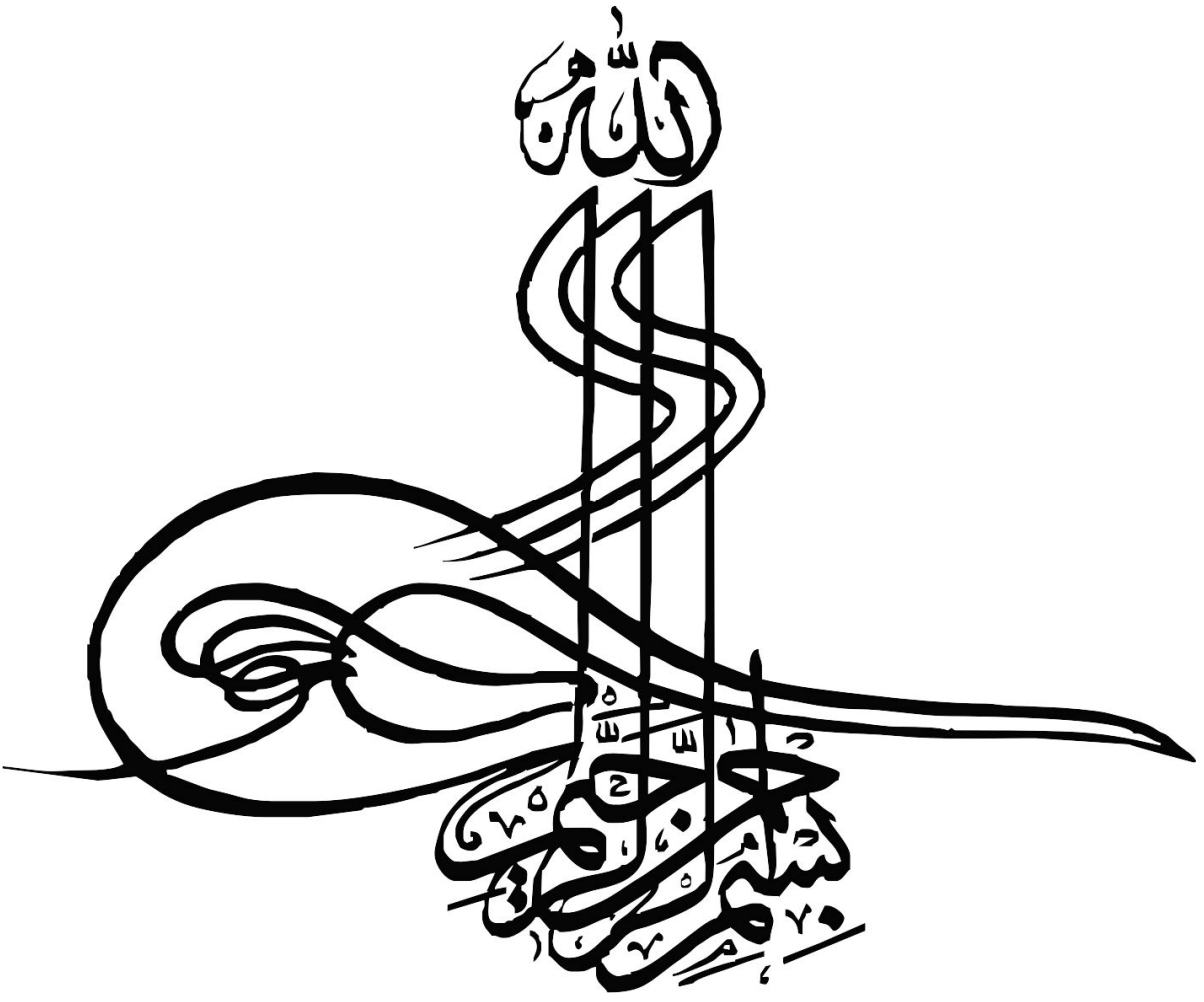
دکتر مهدی بانزاد

استاد مشاور:

دکتر ناصر پریز

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۸۹



تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که صبورانه این فرصت را به من دادند که در جهت دستیابی به
آرزوهایم کام بردارم.

تشکر و قدردانی

با تشکر از استاد عزیزم جناب آقای دکتر بانژاد که با صبر و حوصله فراوان
مرا در تهیه این پایان‌نامه یاری رساندند.

چکیده

پایداری ولتاژ به معنی توانایی سیستم قدرت در حفظ ولتاژ حالت ماندگار باس‌ها در رنج قابل قبول و به-ازای همه شرایط سیستم می‌باشد. در سیستم‌های قدرت گسترش یافته امروزی، جبران‌ساز استاتیک توان راکتیو (SVC) یکی از ادوات مهم بهبود پایداری ولتاژ شبکه می‌باشد. این جبران‌ساز با تزریق توان راکتیو در محل نصب قادر است نوسانات ولتاژ ناشی از تغییر در حالت سیستم در حین تغییر ناگهانی بار و یا بروز خطا را در محدوده کنترل شده حفظ نماید و به پایداری ولتاژ سیستم کمک نماید. تعیین نقطه بهینه نصب SVC به منظور دستیابی به این هدف، موضوع بسیاری تحقیقات در حوزه پایداری ولتاژ بوده است. از طرف دیگر افزایش بارگذاری در خطوط که ناشی از برخی ملاحظات اقتصادی است، باعث پررنگ‌تر شدن اثرات غیرخطی سیستم گردیده است که ضرورت استفاده از روش‌های نوین را برای حل مسأله مکان‌یابی ایجاد می‌کند. در این پروژه مکان‌یابی SVC به روش تحلیل استاتیک پایداری ولتاژ بر مبنای معادلات پخش بار و به کمک ضرایب مشارکت مد-باس ارائه گردیده است. به منظور وارد کردن اثرات غیرخطی معادلات پخش بار در شرایط بارگذاری سنگین، از روش تحلیلی فرم نرمال استفاده شده است. همچنین اثر نحوه مدل‌سازی بار بر مکان‌یابی نیز در این پروژه بررسی شده است. سپس مسأله بر روی یک سیستم قدرت نمونه پیاده‌سازی شده و با استفاده از شاخص‌های استاتیکی پایداری ولتاژ میزان کارایی روش در شرایط بارگذاری مختلف به ازای حالات مختلف مدل‌سازی بار مورد ارزیابی قرار گرفته-است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده است که نوع مدل بار نقش بسزایی در مکان‌یابی SVC برای بهبود پایداری ولتاژ دارد.

کلمات کلیدی: پایداری ولتاژ، فرم نرمال، جبران‌ساز استاتیک توان راکتیو، ضرایب مشارکت، ماتریس

ژاکوبین، مقدار ویژه، مدلسازی بار

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه.....	۱
(۱-۱) مقدمه.....	۲
فصل دوم: معرفی روش فرم نرمال.....	۶
۱-۲-۱ مقدمه.....	۷
۲-۲-۱ فرم نرمال فضای برداری.....	۸
۱-۲-۲ تبدیل فرم جردن.....	۸
۲-۲-۲ تبدیل غیر خطی.....	۸
۳-۲-۱ فرم نرمال غیر همریخت [۲].....	۱۲
۱-۳-۲ تبدیل غیر خطی غیر همریخت [۲].....	۱۲
۴-۲ کاربرد روش فرم نرمال فضاهای برداری در تحلیل سیگنال کوچک سیستم قدرت.....	۱۴
۵-۲ شاخص های مهم فرم نرمال برداری در تحلیل سیگنال کوچک.....	۱۸
۱-۵-۲ ضرایب شرکت پذیری.....	۱۸
۲-۵-۲ ضرایب مشارکت غیر خطی.....	۱۹
۳-۵-۲ شاخص غیر خطی بودن.....	۲۱
۴-۵-۲ شاخص برهم کنش خطی.....	۲۲
۵-۵-۲ معیارهای تداوم اثرات مدال غیر خطی.....	۲۲
۶-۲ محاسبه شرایط اولیه z_0	۲۳
۷-۲ جمع بندی.....	۲۵
فصل سوم: اثرات SVC و مدل بار در پایداری ولتاژ سیستم قدرت.....	۲۶
۱-۳-۱ مقدمه.....	۲۷
۲-۳-۱ اصول کلی تحلیل پایداری ولتاژ.....	۲۸
۳-۳-۱ روشهای تحلیل پایداری ولتاژ سیستم قدرت.....	۲۹
۴-۳-۱ شاخص های ارزیابی کمی پایداری ولتاژ سیستم قدرت.....	۳۱
۱-۴-۳ شاخص های مبتنی بر حالت.....	۳۱

۳۴	۲-۴-۳- شاخص های مبتنی بر انحراف بزرگ.....
۳۴	۳-۴-۳- مطالعات پایداری به وسیله تحلیل حساسیت.....
۳۷	۵-۳- تحلیل مدال برای ارزیابی پایداری ولتاژ.....
۳۷	۱-۵-۳- ماتریس ژاکوبین کاهش یافته.....
۳۹	۲-۵-۳- مدهای ناپایداری ولتاژ.....
۴۱	۳-۵-۳- ضریب مشارکت باس.....
۴۱	۶-۳- مدلسازی بار در سیستم قدرت.....
۴۲	۱-۶-۳- مفاهیم پایه مدلسازی بار.....
۴۲	۲-۶-۳- مدل‌های استاتیکی بار.....
۴۵	۷-۳- مدلسازی SVC در مطالعات پایداری ولتاژ.....
۴۷	۸-۳- معرفی ساختمان SVC.....
۴۸	۹-۳- مدلسازی SVC در مطالعات استاتیکی سیستم قدرت.....
۴۸	۱-۹-۳- استخراج روابط مداری SVC.....
۵۱	۲-۹-۳- مدل‌های متداول پخش بار SVC.....
۵۳	۳-۹-۳- مدل سوسپیتانس موازی متغیر.....
۵۴	۴-۹-۳- مدل زاویه آتش.....
۵۵	۵-۹-۳- مدل ترکیبی ترانسفورماتور- زاویه آتش.....
۵۷	۱۰-۳- نحوه انجام کنترل ولتاژ SVC در مدلسازی پخش بار.....
۵۷	۱۱-۳- مشخصه های عملکرد SVC.....
۵۸	۱-۱۱-۳- مشخصه دینامیکی.....
۶۰	۱۲-۳- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه مکانیابی SVC.....
۶۱	۱۳-۳- جمع بندی.....

فصل چهارم: مکانیابی SVC بر اساس روش فرم نرمال به منظور بهبود پایداری ولتاژ و بررسی

۶۲	اثر مدل بار بر آن.....
۶۳	۱-۴- مقدمه.....
۶۴	۲-۴- معادلات پخش بار و طرح مسئله.....
۶۵	۳-۴- جبران سازی استاتیکی توان راکتیو (SVC).....
۶۶	۴-۴- پیاده سازی فرم نرمال غیر همریخت در مسأله مکانیابی SVC برای بهبود پایداری ولتاژ.....
۶۷	۱-۴-۴- نحوه تأثیر محاسبه ضرایب مشارکت.....

۶۹	۵-۴-محاسبه ماتریس هسین و ماتریس حالت
۷۴	۶-۴- نحوه وارد کردن مدل SVC در معادلات
۷۵	۷-۴- مراحل انجام مکان یابی SVC برای بهبود پایداری قدرت با استفاده از فرم نرمال
۷۶	۸-۴- تأثیر مدل سازی بار بر مکان یابی SVC با استفاده از تحلیل فرم نرمال
۷۷	۴-۸-۱- محاسبه ماتریس های حالت و ماتریس های هسین با در نظر گرفتن مدل بار ZIP
۷۹	۴-۹- مراحل انجام مکان یابی SVC برای بهبود پایداری قدرت با استفاده از فرم نرمال و با در نظر گرفتن مدل بار
۸۱	۴-۹- جمع بندی
۸۲	فصل پنجم: شبیه سازی
۸۳	۵-۱- مقدمه
۸۳	۵-۲- سیستم تحت آزمایش
۸۴	۵-۳- مراحل شبیه سازی مسأله مکانیابی SVC
۸۶	۵-۴- مکان یابی به ازای شرایط بارگذاری مختلف
۸۶	۵-۴-۱- حالت اول - سیستم استاندارد
۸۹	۵-۴-۲- حالت دوم- سیستم با بارگذاری سنگین
۹۳	۵-۴-۳- حالت سوم- سیستم در حالت بارگذاری نزدیک به حد بحرانی
۹۷	۵-۵- بررسی اثر مدلسازی بار به ازای شرایط مختلف بارگذاری در سیستم بر مکان یابی SVC با استفاده از تحلیل فرم نرمال
۹۷	۵-۵-۱- مراحل شبیه سازی مسأله مکانیابی SVC با در نظر گرفتن مدل بار
۹۹	۵-۵-۲- نحوه انتخاب باس هایی که مدلسازی بار در آن ها انجام می شود
۹۹	۵-۵-۳- مدلسازی بار با فرض غالب بودن بارهای جریان ثابت
۱۰۲	۵-۵-۴- مدلسازی بار با فرض غالب بودن بارهای امپدانس ثابت
۱۰۵	۵-۵-۵- مدلسازی بار با فرض غالب بودن بارهای توان ثابت
۱۰۵	۵-۶- تحلیل نتایج شبیه سازی مدلسازی بار
۱۰۷	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۸	۶-۱- نتیجه گیری
۱۱۰	۶-۲- پیشنهادات
۱۱۲	ضمائم

۱۱۳	الف) داده های سیستم ۳۹ باس NEW ENGLAND [۴۵]
۱۱۳	الف-۱) داده های مربوط به باس های سیستم
۱۱۴	الف-۱) داده های مربوط به خطوط انتقال
۱۱۶	مراجع

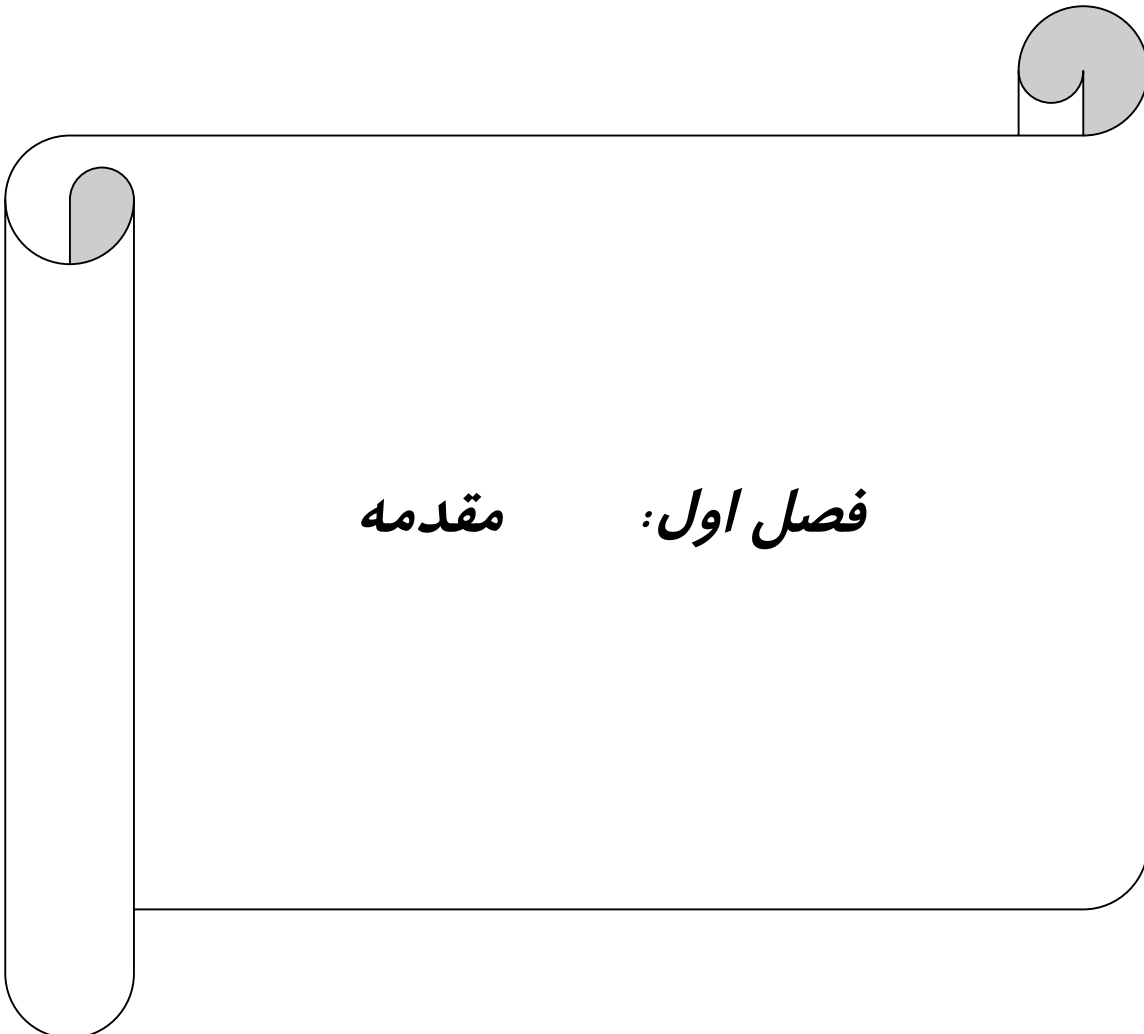
لیست شکل ها

- شکل (۱-۳): ساختارهای مختلف SVC / مشخصه ساده ولتاژ-جریان [۲۴] ۴۸
- شکل (۲-۳). نمای یک SVC شامل خازنهای ثابت و راکتورهای تریستور کنترلی [۲۵] ۴۹
- شکل (۳-۳). مشخصه ولتاژ- جریان سیستم قدرت و SVC [۲۴] ۵۲
- شکل (۴-۳). مدل‌های متداول پخش بار SVC [۲۵] (الف) مدل شیب ب) مدل شیب و ترانسفورماتور .. ۵۳
- شکل (۵-۳). مدل سوسپیتانس متغیر [۲۵] ۵۳
- شکل (۶-۳). مدل ترکیبی SVC با ترانسفورماتور [۲۵] ۵۵
- شکل (۷-۳). مشخصه های ولتاژ- جریان و توان راکتیو SVC [۲۳] ۵۸
- شکل (۱-۴). مدل سوسپیتانس متغیر SVC [۲۵] ۷۵
- شکل (۲-۴). مراحل انجام روش مکانیابی SVC با استفاده از روش فرم نرمال ۷۶
- شکل (۳-۴). مراحل انجام روش مکانیابی SVC با استفاده از روش فرم نرمال و با در نظر گرفتن مدل بار ۸۰
- شکل (۱-۵). سیستم ۳۹ باس NEW ENGLAND [۴۵] ۸۴
- شکل (۲-۵). مراحل شبیه‌سازی مکانیابی SVC ۸۵
- شکل (۳-۵). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم به ازای بارگذاری سبک ۸۸
- شکل (۴-۵). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم به ازای بارگذاری سنگین ۹۱
- شکل (۵-۵). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم به ازای بارگذاری نزدیک به حد بحرانی ۹۵
- شکل (۶-۵). مراحل شبیه‌سازی مکانیابی SVC با در نظر گرفتن مدل بار ۹۸
- شکل (۷-۵). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم در مدل‌سازی جریان ثابت به ازای بارگذاری استاندارد ۱۰۱

- شکل (۵-۸). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم در مدل‌سازی جریان ثابت به ازای بارگذاری سنگین ۱۰۲
- شکل (۵-۹). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم در مدل‌سازی امیدانس ثابت به ازای بارگذاری سبک ۱۰۴
- شکل (۵-۱۰). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم در مدل‌سازی امیدانس ثابت به ازای بارگذاری سنگین ۱۰۴

لیست جداول

- جدول (۵-۱). نتایج پخش بار حالت استاندارد..... ۸۶
- جدول (۵-۲). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری استاندارد..... ۸۷
- جدول (۵-۳). مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم
..... ۸۷
- جدول (۵-۴). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری سنگین..... ۹۰
- جدول (۵-۵). مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم
به ازای بارگذاری سنگین..... ۹۰
- جدول (۵-۶). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری سنگین و با نصب SVC در باس ۷..... ۹۲
- جدول (۵-۷). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری سنگین و با نصب SVC در باس ۱۲ ... ۹۳
- جدول (۵-۸). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری نزدیک به حد بحرانی..... ۹۴
- جدول (۵-۹). مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باسها در مد بحرانی سیستم
به ازای بارگذاری نزدیک به حد بحرانی..... ۹۴
- جدول (۵-۱۰). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری نزدیک به حد بحرانی و با نصب SVC در
باس ۴..... ۹۶
- جدول (۵-۱۱). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری نزدیک به حد بحرانی و با نصب SVC در
باس ۱۵..... ۹۶
- جدول (۵-۱۲). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت مدلسازی بار جریان ثابت در شرایط بارگذاری
سبک (استاندارد)..... ۱۰۰
- جدول (۵-۱۳). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت مدلسازی بار جریان ثابت در شرایط بارگذاری
سنگین..... ۱۰۰
- جدول (۵-۱۴). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت مدلسازی بار امیدانس ثابت در شرایط بارگذاری
سبک (استاندارد)..... ۱۰۳
- جدول (۵-۱۵). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت مدلسازی بار امیدانس ثابت در شرایط بارگذاری
سنگین..... ۱۰۳



فصل اول: مقدمه

۱-۱) مقدمه

توسعه و تکامل سیستم‌های قدرت، منجر به مسائل جدیدی شده است که در سیستم‌های قدرت گذشته مطرح نبوده است. از دیدگاه رفتار دینامیکی، با توجه به اینکه سیستم‌های قدرت در زمره سیستم‌های دینامیکی غیرخطی هستند، پیچیدگی و اهمیت مسائل پایداری در آن‌ها افزایش روز افزون یافته است. از جمله مسائل نسبتاً جدیدی که در سیستم‌های قدرت توسعه‌یافته امروزی با آن مواجه هستند، مسأله ناپایداری ولتاژ است. مسأله پایداری ولتاژ زیر مجموعه‌ای از مسائل پایداری سیستم‌های قدرت و مربوط به رفتار دینامیکی آن‌ها در پی وقوع اختلال هاست. به همین علت از حدود دو دهه قبل مباحثات فراوانی در این زمینه بین محققان و مؤلفان مختلف مطرح بوده است. ربط دادن ناپایداری ولتاژ به مشخصه غیرخطی سیستم و ضرورت استفاده از روش‌ها و شاخص‌های شبه استاتیک به منظور تحلیل پایداری ولتاژ سیستم، بر پیچیدگی مفاهیم آن افزوده است.

هنگامی که یک سیستم به نقطه فروپاشی ولتاژ نزدیک می‌شود اندازه ولتاژ برخی باس‌های بحرانی^۱ با افزایش میزان تقاضای بار به یکباره افت شدیدی می‌کند. بنابراین مسأله ناپایداری ولتاژ از دید جبران-سازی توان راکتیو، با ایجاد یک منبع توان راکتیو پشتیبان به این باس‌های بحرانی تا حدود زیادی مرتفع می‌شود. در ابتدا بانک‌های خازنی به منظور تزریق توان راکتیو ثابت جهت پشتیبانی ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گرفتند. کنترل میزان توان راکتیو تولیدی بانک‌های خازنی یکی از مشکلات عمده استفاده از این روش بوده است. این امر زمانی که سیستم نیازمند یک پاسخ سریع به اغتشاشات می‌باشد نمود بیشتری پیدا می‌کند. در سیستم‌های جدید، گرایش به سمت استفاده از ادوات FACTS^۲ و بطور ویژه جبران‌ساز

^۱ Critical

^۲ Flexible AC Transmission System

استاتیک توان راکتیو^۱ در مسأله ناپایداری ولتاژ به منظور ایجاد کنترل کامل بر میزان توان راکتیو تزریقی بوده است.

ساختمان SVC شامل خازن ها و راکتورهای کلیدزنی شده توسط تریستور می باشد. با کنترل هماهنگ این مجموعه می توان توان راکتیو SVC را تغییر داد. اولین SVC تجاری در سال ۱۹۷۰ برای یک کوره قوس الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. از آن زمان به بعد SVC از مقبول ترین و پرکاربردترین ادوات FACTS می باشد.

یک جبران کننده استاتیک توان راکتیو قادر است به طور پیوسته توان راکتیو مورد نیاز برای کنترل نوسانات دینامیکی ولتاژ را در شرایط مختلف سیستم تأمین کرده و به این وسیله باعث بهبود پایداری ولتاژ سیستم گردد. نصب SVC در یک یا چند نقطه مناسب در شبکه قابلیت انتقال را افزایش و تلفات را کاهش می دهد و یک سطح ولتاژ هموار را به ازای شرایط کاری مختلف شبکه فراهم می آورد.

به دلیل اینکه معادلات پخش بار سیستم، غیرخطی هستند، مشخص کردن نقطه نصب SVC یک مسأله ذاتاً پیچیده است. یکی از این روش های حل مسأله که به لحاظ تئوری پایه محکمی دارد تحلیل پایداری ولتاژ شبکه به روش های استاتیکی و از جمله تحلیل حساسیت بر مبنای مقادیر ویژه می باشد. در این روش از ماتریس های ژاکوبین بدست آمده از معادلات پخش بار سیستم استفاده شده و شاخص های مختلفی جهت بررسی وضعیت پایداری شبکه و همچنین شناسایی نواحی ضعیف و باس های بحرانی درگیر با مسأله پایداری ولتاژ از آن استخراج شده است.

روش های استاتیکی فوق بر مبنای خطی سازی معادلات پخش بار سیستم می باشد که در آن سیستم غیر خطی اولیه با تقریب خطی درجه اول در نظر گرفته می شود. در حالتیکه سیستم قدرت اثرات خطی قابل توجهی نداشته باشد این روش می تواند به جواب های صحیح و قابل قبول بیانجامد. با این حال به دلیل

^۱ Static Var Compensator(SVC)

اینکه در یک سیستم قدرت هزینه توسط عوامل مختلفی همچون اقتصاد، محیط و جامعه محدود شده است، تمایل روزافزون به سمت بهره‌برداری هرچه بیشتر از سیستم ساخته شده می‌باشد و این امر ایجاب می‌کند که سیستم قدرت در نزدیکی حدود بحرانی کار کند و تحت استرس و فشار بیشتر باشد. هر چقدر که شبکه پیچیده‌تر شده و بارهای آن بیشتر می‌شود، اثرات غیر خطی نمود بیشتری یافته و بر عملکرد کل سیستم تأثیر بیشتری می‌گذارند.

روش فرم نرمال یکی از روش‌های پیشرو بمنظور تحلیل سیستم‌های غیرخطی می‌باشد. این روش یک فرم ریاضی است که توسط پوانکاره¹ برای ساده‌سازی و حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل غیرخطی ابداع شده است. در این روش با استفاده از یک تبدیل مختصاتی، معادلات غیرخطی را می‌توان ساده و به فرم خطی تبدیل کرد و جزئیات دقیق‌تری از سیستم قدرت را برای تحلیل استاتیک پایداری ولتاژ در سیستم به ارمغان آورد. یکی از مسائلی که با استفاده از این روش می‌توان مورد بررسی قرار داد اثر مدل بار در پایداری ولتاژ شبکه و تعیین نقاط حساس به منظور نصب SVC می‌باشد.

در این پایان‌نامه مسأله مکان یابی SVC با استفاده از تحلیل استاتیکی بر مبنای معادلات خطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با استفاده از روش فرم نرمال متغیرهای غیرخطی نیز در معادلات وارد شده و مسأله با شرایط مختلف بارگذاری سیستم حل گردیده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی یک سیستم نمونه در حالت‌های مختلف بارگذاری زوایای پنهانی از نحوه تأثیرگذاری اثرات غیرخطی سیستم تحت استرس بر تعیین نقطه بهینه نصب SVC را آشکار می‌کند. در ادامه مسأله تأثیر مدلسازی بار در سیستم بر تعیین نقطه بهینه بررسی شده و با انجام شبیه‌سازی یک سیستم نمونه تفاوت‌های موجود در روش‌های مختلف مدلسازی بار مورد تحلیل قرار گرفته است.

ترتیب ارائه مطالب در این پایان‌نامه به صورت زیر است:

¹ Poincare

در فصل دوم تئوری فرم نرمال در فضای دینامیکی و استاتیکی معرفی گردیده و شاخص‌های مورد استفاده در تحلیل سیستم قدرت بر پایه این تئوری استخراج شده است. علاوه بر این موارد، کاربرد این روش در مطالعات سیستم قدرت بررسی شده است.

در فصل سوم به مسأله پایداری ولتاژ به تفصیل پرداخته شده است. در این فصل روش‌های مرسوم تحلیل پایداری ولتاژ سیستم معرفی گردیده است. پس از تقسیم‌بندی روش‌های تحلیل به دو دسته دینامیکی و استاتیکی، بطور خاص روش‌های استاتیکی آنالیز حساسیت و تحلیل مقادیر ویژه^۱ مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در انتها مدل‌های بار متداول در مطالعه پایداری استاتیک ولتاژ بررسی شده است.

همچنین نحوه مدلسازی SVC در مطالعات پایداری استاتیک ولتاژ اختصاص به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است و روش مدلسازی بکار رفته در پروژه توضیح داده شده است. نحوه جبران سازی توان راکتیو از روی مشخصه‌های دینامیکی و حالت ماندگار SVC نیز در این فصل ارائه شده است.

در فصل چهارم به توضیح روش حل بکار گرفته شده برای مسأله مکان یابی SVC با استفاده از روش فرم نرمال با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار پرداخته شده است. در این فصل معادلات لازم جهت انجام محاسبات استخراج شده است که در برنامه نوشته شده به این منظور مورد استفاده قرار گرفته است.

در فصل پنجم روش ارائه شده در این پروژه بر روی یک سیستم قدرت استاندارد ۳۹ باسه پیاده سازی شده است. این پیاده سازی در حالات مختلف بارگذاری سیستم و با در نظر گرفتن انواع مدل‌سازی بار انجام شده است و نتایج بدست آمده از هر حالت تحلیل گردیده و با حالات دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است.

نهایتاً فصل ششم به نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات و راه کارها اختصاص داده شده است.

^۱ Eigen Value Analysis

فصل دوم: معرفی روش فرم نرمال

۲-۱- مقدمه

سیستم قدرت اساساً یک سیستم غیرخطی است. شیوه‌های معمول تحلیل دینامیکی این سیستم، پیش-بینی رفتار و مشخصات پایداری و طراحی کنترل‌کننده‌ها بر اساس خطی‌سازی این معادلات می‌باشد. یک سیستم قدرت تحت استرس شدید اگر دستخوش اغتشاش شود، رفتار پیچیده‌ای از خود بروز می‌دهد که در اکثر موارد بوسیله تحلیل‌های خطی مرسوم قابل تحلیل و توضیح نمی‌باشد.

تاکنون تلاش و وقت بسیاری از محققان بر روی حل معادلات خطی استخراج شده از سیستم قدرت در حوزه زمان و در حوزه فرکانس متمرکز بوده است. بنابراین ارائه روش‌های جدیدی که به کامل شدن تحلیل‌های خطی کنونی و گسترش دامنه کاربرد آن‌ها در سیستم‌های غیرخطی و حصول نتایج دقیق‌تر بیانجامد از اهمیت بالایی برخوردار است [۱].

همان‌گونه که در فصل قبل بیان شد، روش فرم نرمال یک روش ریاضی است که برای ساده‌سازی و حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل غیرخطی استفاده شده است. این روش در حل معادلات غیرخطی درجه اول تحت عنوان فرم نرمال فضای برداری و در ساده‌سازی توابع غیرخطی چند متغیره تحت عنوان فرم نرمال غیرهم‌ریخت^۱ به کار رفته است [۲].

در طول چند سال اخیر برخی محققان به منظور حل برخی مسائل غیرخطی سیستم قدرت از جمله طراحی کنترل‌کننده‌ها [۳,۴,۵]، برهم کنش مدال^۲ بین ادوات FACTS [۶,۷] و بررسی رزونانس در سیستم قدرت [۸] از روش فرم نرمال بهره گرفته اند.

در این فصل به معرفی تئوری فرم نرمال فضای برداری و فرم نرمال غیرهم‌ریخت و نحوه بکارگیری این روش در سیستم قدرت و شاخص‌های کاربردی استخراج شده از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

^۱ Diffeomorphism

^۲ Modal Interaction

۲-۲- فرم نرمال فضای برداری^۱

معادله دیفرانسیل X در فضای حالت حول نقطه تعادل بصورت زیر می باشد [۹].

$$\dot{X} = AX_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n \quad (۱-۲)$$

که X بردار حالت، A ماتریس حالت و X_i جملات چند جمله ای از درجه i ام می باشند.

۲-۲-۱- تبدیل فرم جردن

با استفاده از تبدیل تشابه^۲ $X=Uy$ در معادله دیفرانسیل خواهیم داشت:

$$U\dot{y} = AUy + X_2(Uy) + X_3(Uy) + \dots + X_n(Uy) \quad (۲-۲)$$

که U ماتریس مدال راست^۳ A و y ماتریس متغیرهای حالت فرم جردن می باشد.

با ضرب کردن ماتریس مدال چپ^۴ V ($V=V^{-1}$):

$$\dot{y} = VAUy + VY_2(Uy) + VY_3(Uy) + \dots \quad (۳-۲)$$

$$\dot{y} = Jy + Y_2(y) + Y_3(y) + \dots \quad (۴-۲)$$

که $J=VAU$ ماتریس قطری جردن، J ماتریس ژاکوبین سیستم است و

$$Y_2(y) = VX_2(Uy), \dots \quad (۵-۲)$$

Y_2 جملات چند جمله ای درجه دوم نسبت به متغیر جردن y می باشد.

۲-۲-۲- تبدیل غیر خطی

قدم بعدی پیدا کردن تبدیل غیر خطی مطلوب به منظور حذف کردن جملات درجه بالای دلخواه می

باشد [۲].

¹ Normal Forms Of Vector Field

² Similarity Transform

³ Right Modal Matrix

⁴ Left Modal Matrix

هدف، حذف جملات درجه سوم به بالاست. در این صورت تبدیل غیرخطی در ساده‌ترین فرم به شکل زیر می‌باشد:

$$y = z + h_2(z) \quad (۶-۲)$$

که h_2 تنها شامل جملات درجه دوم بردار حالت فرم نرمال سیستم یعنی Z می‌باشد.

با مرتب کردن تبدیل غیرخطی و حل کردن برای متغیرهای فرم نرمال:

$$z = y - h_2(z) \quad (۷-۲)$$

با دیفرانسیل گرفتن از رابطه بالا (اعمال قاعده زنجیره ای) خواهیم داشت:

$$\dot{z} = \dot{y} - \{D_2[h_2(z)]\} \dot{z} \quad (۸-۲)$$

که D_2 اپراتور مشتق جزئی جملات درجه دوم نسبت به z می‌باشد.

جمله y را می‌توان از معادله (۴-۲) جایگذاری کرد و از جملات مرتبه سوم به بالا صرف‌نظر کرد. در این صورت:

$$\dot{z} = Jy + Y_2(y) - \{D_2[h_2(z)]\} \dot{z} \quad (۹-۲)$$

$$\begin{aligned} \dot{z} &= J[z + h_2(z)] + Y_2(z + h_2(z)) - \{D_2[h_2(z)]\} \dot{z} \\ \dot{z} &= Jz + Jh_2(z) + Y_2(z + h_2(z)) - \{D_2[h_2(z)]\} \dot{z} \end{aligned} \quad (۱۰-۲)$$

Y_2 تابع چند جمله ای درجه دوم است. بنابراین $Y_2(z + h_2(z))$ از جملاتی به شکل $Y_{2kij}(z_i + h_{2i}(z))(z_j + h_{2j}(z))$ تشکیل شده است. در اینجا h_{2i} جملات درجه دومی هستند که عناصر h_2 هستند و Y_{2kij} ضریب تابع Y_2 متناظر با i امین معادله و ضریب دو متغیر i و j می‌باشد (به عنوان مثال به ازای $i=2$ و $j=4$ عبارت $Z_j Z_i$ به صورت $Z_4 Z_2$ در می‌آید که اگر به عنوان آرگومان Y_2 در نظر گرفته شود، حاصل دارای توان ۳ و بالاتر خواهد بود. بنابراین $Y_2(z + h_2(z))$ شامل جملات درجه دوم، سوم و چهارم می‌باشد. $Y_2(z)$ نشان‌دهنده جملات درجه دوم می‌باشد. بدلیل اینکه h_2 تنها جملات درجه دوم را شامل می‌شود. $D(h_2)$ از درجه یک خواهد بود. بنابراین جملات درجه دوم موجود در جمله

آخر را می توان با جایگزینی z با قسمت حقیقی Jz بازنویسی کرد. با صرف نظر کردن از جملات بالاتر از درجه دوم z در معادله بالا:

$$\dot{z} = Jz + Jh_2(z) + Y_2(z) - \{D_2[h_2(z)]\}Jz \quad (11-2)$$

به دلیل اینکه هدف بیان سیستم به صورت $\dot{z} = Jz$ می باشد، لذا دیگر جملات رابطه (11-2) را برابر صفر قرار می دهیم.

$$0 = Jh_2(z) + Y_2(z) - \{D_2[h_2(z)]\}Jz \quad (12-2)$$

در معادله بالا هدف، یافتن تابع h_2 با داشتن جملات معلوم Y_2 می باشد.

با حل معادلات دیفرانسیل (12-2) تابع h_2 را می توان بدست آورد. معادله I ام دستگاه معادلات ماتریس (12-2) بصورت زیر می باشد:

$$0 = \lambda_i h_{2i}(z) + Y_{2i}(z) - \sum_{j=1}^m \left[\frac{\partial}{\partial z_j} \{h_{2i}(z)\} \right] \lambda_j z_j \quad (13-2)$$

که $m=2(n-1)$ تعداد متغیرهای حالات سیستم است.

تابع درجه دوم $h_{2i}(z)$ را به فرم کلی زیر می توان نوشت:

$$h_{2i}(z) = \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m h_{2iab} z_a z_b \quad (14-2)$$

به طور مشابه $Y_{2i}(z)$ به صورت زیر بسط داده می شود:

$$Y_{2i}(z) = \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m Y_{2iab} z_a z_b \quad (15-2)$$

با مشتق گرفتن جزئی از رابطه (14-2) نسبت به z_i خواهیم داشت.

$$\frac{\partial}{\partial z_j} \{h_{2i}(z)\} = \frac{\partial}{\partial z_j} \left\{ \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m h_{2iab} z_a z_b \right\} = h_{2ij} 2z + \sum_{\substack{d=1 \\ d \neq j}}^m h_{2ijd} z_d \quad (16-2)$$

در این صورت معادله دیفرانسیل سطر I ام به شکل زیر نوشته می شود:

$$0 = \lambda_i \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m h_{2iab} z_a z_b + \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m Y_{2iab} z_a z_b - \sum_{j=1}^m \left[h_{2ijj} z_j z_j + \sum_{\substack{d=1 \\ d \neq j}}^m h_{2ijd} z_j z_d \right] \lambda_i z_j \quad (17-2)$$

$$= \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m \{ h_{2iab} z_a z_b + Y_{2iab} z_a z_b \} - \sum_{j=1}^m \sum_{\substack{d=1 \\ d \neq j}}^m \lambda_i h_{2ijd} z_j z_d - \sum_{j=1}^m 2\lambda_i h_{2ijj} z_j z_j$$

دو جمله انتهایی معادله (۱۷-۲) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{\substack{d=1 \\ d \neq j}}^m \lambda_i h_{2ijd} z_j z_d + \sum_{j=1}^m 2\lambda_i h_{2ijj} z_j z_j = \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m (\lambda_a + \lambda_b) h_{2iab} z_a z_b \lambda_i z_j \quad (18-2)$$

در نتیجه:

$$0 = \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m \{ \lambda_i h_{2iab} z_a z_b + Y_{2iab} z_a z_b \} - \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m (\lambda_a + \lambda_b) h_{2iab} z_a z_b \quad (19-2)$$

$$= \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m \{ \lambda_i h_{2iab} + Y_{2iab} - (\lambda_a + \lambda_b) h_{2iab} \} z_a z_b$$

برای برقرار بودن معادله فوق تمامی ضرایب داخل رابطه سیگماها باید برابر صفر باشد:

$$0 = \lambda_i h_{2iab} + Y_{2iab} - (\lambda_a + \lambda_b) h_{2iab} \quad (20-2)$$

با مرتب کردن رابطه بالا ضرایب تبدیل درجه دوم فرم نرمال به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$h_{2iab} = \frac{Y_{2iab}}{\lambda_a + \lambda_b - \lambda_i} \quad i, a, b = 1, 2, \dots, m \quad (21-2)$$

$$\lambda_a + \lambda_b = \lambda_i \quad (22-2)$$

به شرط برقرار نبودن معادله (۲۲-۲) که شرایط رزونانس^۱ نامیده می شود همه جملات بالاتر از درجه دوم

با تبدیل فرم نرمال حذف خواهند شد. به عبارت دیگر یک سیستم شامل جملات درجه اول و دوم معادل

با یک سیستم کاملاً خطی درجه اول در فرم نرمال می باشد. در این صورت:

^۱ Resonance Condition

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Jz \\ \dot{z}_j &= \lambda_j z_j \end{aligned} \quad (23-2)$$

که Z_i متغیر حالت i ام بردار حالت فرم نرمال (Z) می باشد.

۲-۳- فرم نرمال غیر همریخت [۲]

تابع $X(x)$ را با بسط دادن حول نقطه صفر به فرم زیر می توان نوشت:

$$X(x) = AX + X_2(x) + X_3(x) + \dots \quad (24-2)$$

X_i جملات چند جمله ای درجه i ام متغیر X می باشند.

با استفاده از تبدیل تشابهی $X=UY$ رابطه بالا به شکل زیر نوشته می شود:

$$Y(y) = Jy + Y_2(y) + O(|y|^3) \quad (25-2)$$

که در آن:

$$\begin{cases} Y(y) = X(Uy) \\ Y_2(y) = X_2(Uy) \end{cases} \quad (26-2)$$

Y_2 جملات چند جمله ای درجه دوم نسبت به متغیر جردن می باشد.

۲-۳-۱- تبدیل غیرخطی غیر همریخت [۲]

تبدیل زیر را می توان بر روی تابع فوق اعمال کرد:

$$y = z + h_2(z) = H(z) \quad (27-2)$$

در فضای غیر همریخت این تبدیل تابع Y را به \tilde{Y} تبدیل می کند.

$$\tilde{Y}(z) = H^{-1}(Y(H(z))) \quad (28-2)$$

با در نظر گرفتن فرم جردن خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
\tilde{Y}(z) &= H^{-1}(Y(z + h_2(z))) \\
&= H^{-1}(Jz + Jh_2(z) + Y_2(z) + |O(z)^3|) \\
&= Jz + Jh_2(z) + Y_2(z) - h_2(Jz) + |O(z)^3|
\end{aligned} \tag{۲۹-۲}$$

در رابطه بالا از جمله درجه ۳ و بالاتر صرفنظر می‌شود. در اینصورت شرط لازم برای حذف شدن جملات درجه دوم بصورت زیر است.

$$Jh_2(z) + Y_2(z) - h_2(Jz) = 0 \tag{۳۰-۲}$$

فرم کلی توابع $h_2(z)$ و $Y_2(z)$ به ازای یک سطر معادله بصورت زیر است:

$$\begin{aligned}
h_{2i}(z) &= \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m h_{2iab} z_a z_b \\
Y_{2i}(z) &= \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m Y_{2iab} z_a z_b
\end{aligned} \tag{۳۱-۲}$$

با قرار دادن این فرم کلی در معادله بالا:

$$\sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m h_{2iab} \lambda_a \lambda_b z_a z_b + \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m Y_{2iab} z_a z_b - \lambda_i \sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m h_{2iab} \lambda_a \lambda_b z_a z_b = 0 \tag{۳۲-۲}$$

$$\sum_{a=1}^m \sum_{b=a}^m [(\lambda_a \lambda_b - \lambda_i) h_{2iab} + Y_{2iab}] z_a z_b = 0 \tag{۳۳-۲}$$

با صفر قرار دادن ضرایب رابطه تجمعی :

$$h_{2iab} = \frac{Y_{2iab}}{(\lambda_a \lambda_b - \lambda_i)} \quad i, a, b = 1, 2, \dots, m \tag{۳۴-۲}$$

شرط $\lambda_a \lambda_b - \lambda_i = 0$ شرط رزونانس گفته می‌شود. پس تبدیل فرم نرمال در شرایط عدم رزونانس با حذف جملات درجه دوم و بالاتر تابع اولیه را به شکل زیر تبدیل می‌کند:

$$\tilde{Y}(z) = Jz \tag{۳۵-۲}$$

۲-۴- کاربرد روش فرم نرمال فضاهای برداری در تحلیل سیگنال کوچک^۱ سیستم قدرت

همانگونه که اشاره شد، روش فرم نرمال فضای برداری^۲، یک روش ریاضی برای ساده سازی معادلات دیفرانسیل غیر خطی می باشد. با استفاده از این روش تحت شرایطی خاص، یک مجموعه معادله دیفرانسیل با درجه مشخص را می توان با اعمال یک سری تبدیلات مختصاتی غیر خطی، به یک مجموعه معادله دیفرانسیل خطی تبدیل کرد. معادلات تبدیل شده از این طریق به ساده ترین شکل خود (فرم نرمال) در می آیند و امکان مطالعه مشخصات مدال و حل تحلیلی متغیرهای حالت سیستم فراهم می شود.

در این قسمت کاربرد روش فرم نرمال فضاهای برداری در سیستم قدرت بصورت اجمالی توضیح داده خواهد شد. هدف از این قسمت بدست آوردن جنبه های مرتبط با تحلیل مدال سیستم قدرت می باشد. در مرجع [۱۰] توضیحات کاملی در این زمینه ارائه شده است. در ادامه با شرح بیشتر این روش به شاخص های مختلف سنجش مشخصه های مدال درجه بالا اشاره خواهد شد. همانند تحلیل پایداری سیگنال کوچک، روش فرم نرمال در فضاهای برداری مبتنی بر بسط تیلور در همسایگی یک نقطه تعادل پایدار^۳ (این بسط در همسایگی یک نقطه تعادل ناپایدار نیز می تواند انجام شود) می باشد.

اما بر خلاف تحلیل پایداری سیگنال کوچک در اینجا جملات مراتب بالاتر بسط نیز در نظر گرفته می شود. گرچه برای تعداد جملات محدودیتی نداریم اما از آنجائیکه محاسبه جملات درجه بالا برای یک سیستم قدرت بار محاسباتی زیادی به همراه دارد، لذا در اینجا محاسبات مربوط به جملات بالاتر از درجه دو در نظر گرفته نشده است.

معادله فضای حالت یک سیستم قدرت با صرف نظر از جملات درجه بالاتر از ۲ به شکل زیر می باشد.

¹ Small Signal Analysis

² Normal Forms of Vector Field

³ Stable Equilibrium Point

$$\dot{x} = Ax + X_2 \quad (36-2)$$

معادله فضای حالت متغیر حالت i ام بصورت زیر نمایش داده می شود.

$$\dot{x}_i = A_i x + \frac{1}{2} x^T H^i x \quad (37-2)$$

که در آن A_i سطر i ام ماتریس ژاکوبین سیستم و H^i یک ماتریس هسین^۱ می باشد. ماتریس هسین در بردارنده جملات مرتبه دوم و معادل ماتریس Y_2 در رابطه (۵-۲) می باشد. عنصر ik ام ماتریس H از رابطه زیر بدست می آید:

$$H_{jk}^i = \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_k} \quad (38-2)$$

گام بعدی، تبدیل رابطه (۳۳-۲) به فرم جردن با اعمال تبدیل تشابهی به سیستم است. ماتریس U ماتریس مدال ویژه راست و V ماتریس مدال چپ A می باشد. با اعمال این تبدیل معادله بصورت زیر در می آید:

$$\dot{y} = \Lambda y + \frac{1}{2} V^T \begin{bmatrix} y^T U^T H^1 U y \\ y^T U^T H^2 U y \\ \dots \\ y^T U^T H^n U y \end{bmatrix}. \quad (39-2)$$

عناصر ماتریس قطری Λ مقادیر ویژه و V ماتریس بردارهای ویژه چپ مربوط به ماتریس A هستند. معادله حالت متغیر i ام فرم جردن بدین صورت نوشته می شود:

$$\dot{y}_i = \lambda_i y_i + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n C_{kl}^i y_k y_l. \quad (40-2)$$

C_{jk}^i عنصر k ام ماتریس C^i و ماتریس C^j از رابطه زیر بدست می آید.

$$C^j = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n v_{jp} [U^T H^p U]. \quad (41-2)$$

^۱ Hessian

جمله نوشته شده در داخل کروشه رابطه (۴۲-۱) یک ماتریس $n \times n$ و v_{jp} عنصر jp ام ماتریس V است. توجه داشته باشید که جملات رابطه تجمعی (۴۰-۲) شامل چندجمله ای های همگن درجه دوم می باشند. گام بعدی تبدیل معادله (۴۱-۲) به یک شکل نرمال با تبدیل فرم نرمال است.

$$y = z + h_2(z) \quad (42-2)$$

z بردار متغیرهای حالت فرم نرمال است و فرم بسط داده شده رابطه (۳۹-۲) بدین صورت است.

$$y_j = z_j + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_{kl}^j z_k z_l. \quad (43-2)$$

h_{kl}^j از رابطه روبرو بدست می آید.

$$h_{kl}^j = \frac{C_{kl}^j}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j} \quad (44-2)$$

اگر $\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j \neq 0$ ، تبدیل (۷-۲) جملات درجه ۳ را از (۳۳-۲) حذف می کند.

لازم به ذکر است که $\lambda_2(z)$ تنها جملات درجه دوم z را شامل می شود. معادلات بدست آمده یک مجموعه معادلات خطی درجه اول مستقل از هم^۱ هستند.

$$\dot{z} = \Lambda z + o(3); \quad \dot{z}_j = \lambda_j z_j + o(3), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (45-2)$$

$o(3)$ شامل جملات درجه سوم به بالاست و جملات درجه دوم با تبدیل غیر خطی (۴۳-۲) از بین رفته اند. با چشم پوشی از این جملات، حل خطی متغیرهای فرم نرمال از رابطه زیر بدست می آید.

$$z_j(t) = z_{j0} e^{\lambda_j t}. \quad (46-2)$$

در (۴۶-۲)، z_{j0} شرایط اولیه z_j با حل معادله غیرخطی (۴۲-۲) و با داشتن شرایط اولیه y_0 بدست می آید. برای محاسبه متغیر فرم نرمال معادله غیرخطی زیر برای z باید حل گردد.

$$f(z) = z - y_0 + h_2(z) = 0. \quad (47-2)$$

^۱ Decoupled

با حل معادله و تعیین z شرایط اولیه z_0 بدست می‌آید. با استفاده از رابطه فوق معادلات سیستم بطور مستقیم با جملات غیرخطی درجه دوم ربط داده می‌شوند و تفاوت متغیرهای z و y_0 را در حضور جملات h_2 شرح می‌دهد. حل عددی این معادلات نسبتاً دشوار و نسبت به شرایط اولیه حساس است و از این رو نیازمند یک الگوریتم دقیق است.

در حل عددی y_0 به عنوان متغیر اولیه جهت حل معادلات پیشنهاد می‌شود. این انتخاب بر مبنای رفتار سیستم بیان شده در (۲-۴۴)، جایگاه متغیرهای z با توجه به جملات غیر خطی از مقادیر y_0 فاصله می‌گیرند، اتخاذ شده است. حل مجموعه معادلات اولیه (۲-۳۶) با تبدیل متغیرهای z به متغیرهای حالت اولیه x با استفاده از رابطه (۲-۴۲) و محاسبه $z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$ و $y_j(t) = z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_{kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$ و اعمال تبدیل تشابهی $x = Uy$ حاصل می‌شود. در رابطه (۲-۴۸)، U_{ij} ها عناصر ماتریس بردارهای ویژه U هستند.

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n u_{ij} z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{j=1}^n u_{ij} \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_{kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right] \quad (۲-۴۸)$$

معادله (۲-۴۸) تاکنون مبنای مطالعات صورت گرفته در مورد نوسانات الکترومکانیکی سیستم قدرت محسوب می‌شود. زیرا این رابطه، ارتباط بین متغیرهای حالت x_1, x_2, \dots, x_n ، مدهای منفرد سیستم $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ و مدهای درجه دوم $\lambda_1 + \lambda_2, \dots, \lambda_n + \lambda_n$ را نشان می‌دهد. جملات مربوط به مدهای ترکیبی $\lambda_k + \lambda_l$ اطلاعاتی را به همراه دارند که در تقریب خطی معادلات سیستم قدرت قابل دسترسی نیستند. این جملات، برهم‌کنش‌های مدال ناشی از در نظر گرفتن جملات درجه بالا را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که ضرایب جملات نمایی $e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$ ، معیاری برای مشارکت مد ترکیبی $\lambda_k + \lambda_l$ در یک متغیر حالت مشخص محسوب می‌شوند. بنابراین این رابطه می‌تواند یک ابزار تحلیلی مؤثر برای توضیح برهم‌کنش‌های مدالی باشد که مدهای ترکیبی سیستم را در نظر می‌گیرد. این رابطه یک دورنمای کلی‌تر از مشخصه‌های دینامیکی سیستم به ما می‌دهد که با تقریب خطی، امکان‌پذیر نیست. در ادامه

این بخش برای اشاره به $\lambda_k + \lambda_l$ از اصطلاحات مدهای درجه دوم و یا مدهای ترکیبی استفاده شده است. کوچک بودن مقادیر $h2_{kl}^j$ معادله سیستم بیانگر این نکته است که اگر سیستم پایدار باشد جملات درجه دوم شامل $e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$ نسبت به مدهای درجه اول $e^{\lambda_k t}$ و $e^{\lambda_l t}$ میرایی شدیدتری دارند [۳].

۲-۵- شاخص های مهم فرم نرمال برداری در تحلیل سیگنال کوچک

شاخص هایی که در این قسمت توضیح داده می شوند برای مشخص کردن و اندازه گیری کمی برهم کنش های غیرخطی و برای توصیف مشخصه های مهم سیستم از قبیل برهم کنش های مد- حالت^۱ استخراج شده اند.

۲-۵-۱ ضرایب شرکت پذیری^۲

در حالت خطی حل فرم جردن برابر است با $y_j(t) = y_{j0} e^{\lambda_j t}$ که شرایط اولیه متغیر حالت زام در مختصات جردن سیستم است [۵]. حل خطی متغیر حالت i ام درحوزه زمان برابر است با :

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n u_{ij} y_{j0} e^{\lambda_j t} = \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} e^{\lambda_j t} \quad (۲-۴۹)$$

مقادیر $\sigma_{ij} = U_{ij} y_{j0}$ را ضرایب شرکت پذیری خطی نامیده می شوند [۵]. این ضرایب سهم مد زام را در نوسانات حالت i ام در طی یک اختلال نشان می دهد. جواب به دست آمده در (۲-۴۸) از مجموع جملات نوسانی نمایی تشکیل شده است که وزن های آن ضرایب شرکت پذیری هستند. قسمت های موهومی مقادیر ویژه (λ_j) نشان دهنده فرکانس نوسان می باشند. با مقایسه حل های خطی و درجه دوم داده شده توسط رابطه های (۲-۴۸) و (۲-۴۹) در می یابیم که حل درجه دوم شامل فرکانس های نوسان بیشتری است. جملات داخل پرانتز در (۲-۴۸) تأثیر جملات درجه دوم مرتبط با ترکیب فرکانس های فرم جردن

¹ Mode-State

² Contribution Factors

را نشان می دهد. همانطور که در (۲-۴۹) نشان داده شده است این تأثیرات با استفاده از بردارهای ویژه راست (V_{ij}) به حالت x منتقل می شوند. رابطه (۲-۴۹) را بصورت زیر می توان بازنویسی کرد :

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n \sigma_{2ij} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=k}^n \sigma_{22ikl} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (۲-۵۰)$$

$$\sigma_{22ikl} = z_{k0} z_{l0} \sum_{j=0}^n u_{ij} h_{kl}^j \quad \text{و} \quad \sigma_{2ij} = U_{ij} z_{j0} \quad \text{که}$$

از آنجائیکه ماتریس H^i ، $i=1, \dots, n$ متقارن است، رابطه (۲-۴۹) با نمادگذاری $k=1$ و $l=k$ نمایش داده می شود. بنابراین ضرایب شرکت پذیری درجه دوم به شیوه ای مشابه با ضرایب شرکت پذیری خطی تعریف می شوند. این ضرایب شاخص هایی از اندازه و فاز نوساناتی هستند که حل تقریبی درجه دوم را برای حالت ها تشکیل می دهند. σ_{2ij} مشارکت مد متناظر با مقدار ویژه منفرد (λ_j) در پاسخ حالت i ام می باشد. بطور مشابه σ_{22ikl} ، مشارکت مد ترکیبی ($\lambda_k + \lambda_l$) را در متغیر حالت i ام نشان می دهد. (توجه داشته باشید که ضریب شرکت پذیری σ_{ij} قسمتی از ضریب شرکت پذیری درجه دوم σ_{2ij} را شامل می شود).

۲-۵-۲- ضرایب مشارکت غیرخطی ۱

ضرایب مشارکت خطی که برای اولین بار در [۱۱] تعریف شده اند، شاخص متداول برای برهم کنش های مد- حالت می باشند. ضریب مشارکت p_{ij} معیاری از مشارکت حالت i ام در خط سیر مد i ام است. یکی از مزایای استفاده از ضرایب مشارکت این است که آنها روابط مد- حالت را بطور مستقل از مقیاس بندی بردارهای ویژه اندازه گیری می کنند. این امر بخاص این است که این ضرایب توابعی از هر دو بردارهای ویژه راست و چپ می باشند. در [۱۲] مشاهده می شود که ضرایب مشارکت اندازه نوسانات مدال در یک حالت را در شرایطی که فقط آن مد دچار اغتشاش می شود نشان می دهد. بنابراین بردار شرایط اولیه

¹ Participation Factors

$x_0 = e_j$ (همه عناصر e_j بجز عنصر j ام برابر صفرند) خواهد بود. این بدین معنی است که وقتی که

$x_0 = e_j$ ، پاسخ زمانی متغیر حالت i ام x_i برابر است با:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n P_{ij} e^{\lambda_j t} \quad (51-2)$$

در این نوع از تحلیل پاسخ کلی از مجموع پاسخ های هر متغیر حاصل می شود. با استفاده از تئوری فرم نرمال این مفهوم می تواند جملات درجه دوم را نیز در بر گیرد. تبدیل معکوس تقریبی فرم نرمال برای هر شرایط اولیه بوسیله $z_j = y_j - h2^i(y)$ انجام می شود. وقتی که بردار شرایط اولیه $x_0 = e_j$ اعمال شود، شرایط اولیه فرم جردن مطابق زیر خواهد بود:

$$y_{j0} = v_{ji} \quad (52-2)$$

شرایط اولیه فرم نرمال با استفاده از تقریب تبدیل معکوس (53-2) مطابق زیر بدست می آید :

$$z_j(t) = y_{j0} e^{\lambda_j t} - \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h2_{kl}^j y_{k0} y_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (53-2)$$

$$z_{j0} = v_{ji} - \sum_{k=1}^n \sum_{l=k}^n h2_{kl}^j v_{ki} v_{li} = v_{ji} + v2_{jii} \quad (54-2)$$

حل متغیر حالت i ام (وقتی که برای همه y ، $j \neq i$ ، $x_{j0} = 0$) بدین صورت نوشته می شود :

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n u_{ij} (v_{ji} + v2_{jii}) e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n u2_{ikl} (v_{ki} + v2_{kii}) (v_{li} + v2_{lii}) e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (55-2)$$

با استفاده از روشی مشابه با حالت خطی، ضرایب مشارکت غیرخطی مطابق زیر بدست می آیند :

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n p2_{ij} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n p2_{kl}^i e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (56-2)$$

معادله فوق دو نوع از ضرایب مشارکت درجه دوم را نشان می دهد که در ادامه در مورد آنها توضیح داده می شود. $p2_{ij}$ مشارکت درجه دوم حالت i ام را در مد متناظر با مقدار ویژه منفرد j ام نشان می دهد. این ضرایب به نوعی ضرایب مشارکت بدست آمده از حالت خطی را تصحیح می کنند. در حقیقت با نگاه به

رابطه (۲-۵۵) می توان دریافت که ضرایب مشارکت خطی ($p_{ij} = u_{ij}v_{ji}$) یکی از جملات مربوط به $p_{2_{ji}}$ است. نوع دوم ضرایب مشارکت درجه دوم ($p_{2_{ji}}$)، میزان مشارکت حالت i ام را در مد ترکیبی حاصل از مقادیر ویژه λ_k و λ_l نشان می دهد. مشابه حالت خطی، این ضرایب درجه دوم مستقل از مقیاس بندی بردارهای ویژه هستند.

برای بدست آوردن مقادیر شرایط اولیه دقیق در فرم نرمال، یک روند تکراری برای حل (۲-۴۸) و یافتن z_0 بطور عددی مورد استفاده قرار گرفته است. گرچه این روش عددی فرمولی برای تبدیل معکوس فرم نرمال ارائه نمی کند اما مقادیر عددی دقیق تری برای شرایط اولیه فرم نرمال در بر دارد. چون که ضرایب مشارکت با اعمال یک شرایط اولیه خاص ($x_0 = e_j$) بدست می آیند، آن ها را می توان بطور عددی و با استفاده از روش تکرار بدست آورد. وقتی که بردار شرایط اولیه x_0 مساوی e_j قرار داده شود، ضرایب شرکت پذیری همان ضرایب مشارکت می وند.

۲-۵-۳- شاخص غیر خطی بودن

این شاخص ها مقیاسی از اثر جملات غیر خطی در حل تقریبی و تحلیلی می باشند. این شاخص ها حل بدست آمده از جملات خطی را با حل بدست آمده از جملات درجه دوم مقایسه کرده و گستره ای را که جملات درجه دوم غالب هستند معین می کنند. برای همه متغیرهای حالت فرم جردنی که توسط اغتشاش تحریک شده اند، این شاخص مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس متغیری که بیشترین شاخص $I(j)$ را داراست مشخص می شود. مقدار بالای $I(j)$ نشان دهنده درجه بالای اثرات غیرخطی در یک متغیر و برهم کنش مد اصلی با مدهای دیگر درجملات درجه دوم می باشد. یک مقدار زیاد از $I(j)$ می تواند نشان دهد که جملات درجه دوم ناشی از برهم کنش های غیرخطی، حائز اهمیت هستند و همچنین در شرایطی که اختلاف z_{j0} و y_{j0} زیاد باشد این شاخص می تواند نشان دهد که جملات درجه دوم تأثیر زیادی در پاسخ زمانی متغیر مربوطه دارند [۱۲].

$$I(j) = \frac{|(y_{j0} - z_{j0}) + \max_{k,l} (h 2_{kl}^j z_{k0} z_{l0})|}{|z_{j0}|} \quad (57-2)$$

۲-۵-۴- شاخص برهم کنش خطی

این شاخص نشان می دهد که اثرات غیرخطی ایجاد شده توسط جملات درجه دوم در چه جاهایی نمایانگر یک برهم کنش مدال غیر خطی و در چه جاهایی تنها بر روی حل اولیه متغیرهای z تأثیر می گذارند [۱۲].

$$II(j) = \frac{\max_{k,l} |(h 2_{kl}^j z_{k0} z_{l0})|}{|z_{j0}|} \quad (58-2)$$

۲-۵-۵- معیارهای تداوم اثرات مدال غیرخطی

برای سنجش گستره غالب بودن مدهای مختلف در پاسخ زمانی سه معیار تعریف شده است. این معیارها $\Pi(j) \times T_r, T_r, T_{set}$ هستند و به صورت زیر تعریف می شوند [۱۲].

الف) معیار T_{set}

این معیار نشان دهنده ثابت زمانی میرایی مد ترکیبی است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$T_{set} = \frac{-4.0}{\text{Real}(\lambda_k + \lambda_l)} \quad (59-2)$$

در این رابطه مد $\lambda_k + \lambda_l$ یک مد ترکیبی دلخواه می باشد.

ب) معیار T_r

T_r نشان دهنده نسبت ثابت زمانی مدهای ترکیبی به ثابت زمانی مد غالب می باشد و از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$T_r = [\text{ثابت زمانی مد غالب} (\lambda_i)] / [\text{ثابت زمانی مد ترکیبی} (\lambda_k + \lambda_l)] \quad (60-2)$$

مقدار کوچک T_r نشان دهنده حضور قابل توجه مد ترکیبی می باشد. مقدار زیاد $\Pi(j) \times T_r$ بیانگر یک برهم کنش مدال قوی با دوره تداوم طولانی است و در واقع شاخصی برای انرژی برهم کنش مدال محسوب می شود. این معیار برای مشخص کردن اینکه یک مد ترکیبی در چگالی طیفی توان در حین یک اغتشاش ظاهر می شود بکار می رود که آن را شاخص انرژی مد ترکیبی می نامند.

۲-۶- محاسبه شرایط اولیه z_0

شرایط اولیه متغیرهای فرم نرمال یک جنبه حیاتی برای محاسبه شاخص های مختلفی که در بخش قبل شرح داده شد، می باشد. شرایط اولیه متغیر حالت x برای هر سیستم نمونه بوسیله یک برنامه پایداری گذرای^۱ متداول بدست می آید. برای بدست آوردن شرایط اولیه متغیرهای فرم نرمال و حل معادلات داده شده در [۱۳] روند زیر بکار می رود :

۱- بدست آوردن x_0 از رابطه $x_0 = x_{cl} - x_{sep}$ که x_{sep} نقطه تعادل پس از اغتشاش و x_{cl} شرایط سیستم در پایان اغتشاش است که از برنامه پایداری گذرا بدست می آید.

۲- بدست آوردن y_0 از رابطه $y_0 = V^T x_0$ که V ماتریس مقادیر ویژه در نقطه پس از اغتشاش^۲ می باشد.

۳- محاسبه z_0 : معادله (۲-۴۷) را با استفاده از روش نیوتن-رافسون می توان بصورت زیر برای z_0 حل کرد.

الف- فرمول بندی مسئله غیرخطی :

$$f_j(z) = z_j + \sum_{k=1}^n \sum_{l=k}^n h_{kl}^j z_k z_l - y_j = 0$$

ب- انتخاب یک تخمین اولیه برای z_0 :

^۱ Transient Stability Program

^۲ Post Disturbance

تحلیل سیستم های نمونه مختلف نشان می دهد که انتخاب $z_0 = y_0$ بهترین نتایج را در بر دارد. شمارنده تکرار s را با مقدار صفر راه اندازی می شود.

ج- محاسبه تابع عدم تطابق برای تکرار s ام :

$$f_j(z^{(s)}) = z_j^{(s)} - y_j + \sum_{k=1}^n \sum_{l=k}^n h_2^j z_k^{(s)} z_l^{(s)} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

د- محاسبه ژاکوبین $f(z)$ در $z^{(s)}$:

$$[A(z^{(s)})] = \left[\frac{\partial f}{\partial z} \right]_{z=z^{(s)}}$$

$$\Delta z^{(s)} = -[A(z^{(s)})]^{-1} f(z^{(s)}) \quad \text{ه) محاسبه گام اولیه}$$

و) محاسبه طول گام بهینه μ با درونیابی مکعبی و یا روش های مناسب دیگر :

$$z^{(s+1)} = z^{(s)} + \mu \Delta z^{(s)}$$


ز) ادامه روند تکرار تا رسیدن به یک دقت مشخص. مقدار محاسبه شده در این نقطه، حل نهایی z می باشد.

از رابطه (۲-۴۷) مشاهده می شود که حل z_0 با مشخص کردن اینکه جملات غیر خطی توصیف شده توسط h_2 چگونه بر متغیرهای y تأثیر می گذارند، حاصل می شود. روند تکراری توضیح داده شده ، تا زمانی که حل آن به یک مقدار مشخص همگرا شود ادامه پیدا می کند. به منظور حصول اطمینان از دقت حل z_0 یک تبدیل معکوس ابتدا به متغیرهای y و پس به متغیرهای z انجام شده و حل x_0 بدست آمده از این طریق با حل بدست آمده از برنامه پاسخ زمانی متداول مقایسه می شود. شایان ذکر است که در تبدیل متغیرهای فرم نرمال z به متغیرهای حالت فرم جردن y ، تقریب $z = y - h_2(y) + o(3)$ می شود. بنابراین مقدار اولیه z_{j0} را می توان با تقریب کاهش داده شده سری

$$z_{j0} \approx y_{j0} - \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_2^j y_{k0} y_{l0} \approx y_{j0}, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

۲-۷- جمع بندی

در این فصل تئوری فرم نرمال فضای برداری و فرم نرمال غیر همریخت معرفی گردید و کاربرد فرم نرمال در استخراج شاخص‌های مختلف تحلیل سیگنال کوچک مورد بررسی قرار گرفت. مطالب مطرح شده در این فصل مبنای محاسبه اثرات غیرخطی است که روش مکان‌یابی SVC جهت بهبود پایداری ولتاژ که در این پایان‌نامه ارائه شده است، بر آن استوار می‌باشد.

A decorative scroll frame with a light gray background and a black outline. The frame has rounded corners and a vertical strip on the left side. The text is centered within the frame.

**فصل سوم: اثرات SVC و مدل بار
در پایداری ولتاژ سیستم قدرت**

۳-۱- مقدمه

پایداری ولتاژ بصورت " توانایی سیستم قدرت در حفظ ولتاژ حالت ماندگار در تمامی باس ها بعد از وقوع اغتشاش و با یک شرایط اولیه مشخص " تعریف می شود [۱۴].

یک سیستم در صورتی پایدار ولتاژی است که ولتاژ و توان آن سیستم در تمام زمان ها قابل کنترل باشد. بطور کلی عدم توانایی سیستم در بر آورده ساختن تقاضای بار منجر به ناپایداری (فروپاشی) ولتاژ می شود.

پدیده ناپایداری ولتاژ می تواند هم به صورت سریع (کسری از ثانیه) و هم به صورت کند (چند دقیقه و یا چند ساعت) اتفاق بیفتد. پایداری ولتاژ کوتاه مدت بسته به عملکرد سریع کنترل کننده های ولتاژ به عنوان مثال تنظیم کننده اتوماتیک ژنراتور^۱، مبدل های الکترونیک قدرت از قبیل ادوات FACTS و یا لینک های HVDC باشد. پایداری ولتاژ بلند مدت بسته به عملکرد ترانسفورماتورهای تغییر تپ دهنده و یا بارزدایی شبکه در مواقع خاص می باشد.

در این فصل به بررسی روش های تحلیل پایداری ولتاژ و مشخصه ها و معیارهای ارزیابی پایداری ولتاژ استاتیک و یا بلند مدت پرداخته خواهد شد. این معیارهای ارزیابی پایداری ولتاژ در فصول بعد برای تعیین معیار مکان یابی SVC به منظور بهبود پایداری ولتاژ استفاده خواهند شد. یکی دیگر از مباحث این فصل معرفی روش های مختلف مدلسازی بار جهت تحلیل استاتیک پایداری ولتاژ می باشد. همچنین روش های مختلف مدلسازی SVC برای مطالعه پایداری ولتاژ ارائه خواهد شد و نحوه عملکرد SVC در کنترل سطح ولتاژ نقطه نصب توضیح داده خواهد شد. همچنین مدل های بار استاندارد جهت بررسی پایداری ولتاژ استاتیک معرفی گردیده و معادلات لازم جهت استفاده در روش مکان یابی SVC استخراج خواهد شد.

^۱ Automatic Voltage Regulator (AVR)

۳-۲- اصول کلی تحلیل پایداری ولتاژ

طبیعت کند پاسخ بارهای سیستم به ازای پدیده های مختلف این امکان را فراهم می آورد تا مسئله پایداری ولتاژ را در دو چهارچوب مجزا مورد تحلیل قرار دهیم.

الف) چهارچوب دینامیکی بلند مدت که همه ادوات با عملکرد کند و بارهای مجتمع یک باس با مدل دینامیکی خود مدل می شوند (در این مورد، تحلیل به وسیله شبیه سازی های دینامیکی پاسخ سیستم به تغییرات بار انجام می شود).

ب) چهارچوب حالت ماندگار (به عنوان مثال پخش بار)

در این چهارچوب هدف، مشخص کردن این نکته است که آیا سیستم پس از وقوع یک رویداد می تواند به یک نقطه کاری متعادل دست پیدا کند یا خیر. این نقطه کاری می تواند یک حالت نهایی و یا یک حالت میانه متأثر از یک عملکرد کنترلی پله ای (مانند تغییر تپ ترانسفورماتور) باشد. میزان نزدیکی^۱ یک سیستم مشخص به ناپایداری ولتاژ و اقدامات کنترلی که برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ ممکن است انجام گیرد، با شاخص ها و حساسیت های مختلفی مورد ارزیابی قرار می گیرد. عمده ترین این شاخص ها به قرار زیر است [۱۵]:

ب-۱) حاشیه بارگذاری^۲

به عنوان مثال فاصله توانی تا یک نقطه فروپاشی ولتاژ و حساسیت این حاشیه ها نسبت به پارامترهای مختلفی چون تغییرات توان اکتیو، راکتیو بار

ب-۳) مقادیر منفرد ژاکوبین سیستم و سایر ماتریس هایی که از این ژاکوبین ها بدست می آیند

و حساسیت آن ها به پارامترهای مختلف

^۱ Proximity

^۲ Loading Margin

ب-۴) پروفیل ولتاژ باس ها و حساسیت آن‌ها به تغییرات توان اکتیو و راکتیو بارها و ژنراتورها و

دیگر منابع توان راکتیو

ب-۵) در دسترس بودن توان راکتیو تولیدی ژنراتور ها، کندانسورهای سنکرون و جبران سازه‌های

توان راکتیو و حساسیت آن‌ها به تغییرات توان اکتیو و راکتیو بار

۳-۳- روش‌های تحلیل پایداری ولتاژ سیستم قدرت

از آنجاییکه سیستم‌های قدرت تحت شرایط استرس می‌باشند، توانایی حفظ پایداری ولتاژ یکی از دغدغه‌های اصلی بوده است. در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، تحلیل پایداری ولتاژ یک سیستم در بردارنده دو جنبه مهم زیر می‌باشد [۱۶]:

الف) سیستم قدرت به چه میزان به ناپایداری ولتاژ نزدیک است؟

ب) هنگامیکه ناپایداری ولتاژ اتفاق می‌افتد عوامل کلیدی دخیل در آن نقاط ضعیف ولتاژ و مناطق تحت تاثیر چه می‌باشند؟

مورد اول معیاری جهت امنیت ولتاژ در شبکه است. مورد دوم اطلاعات مفیدی به دست می‌دهد که بهره‌بردار و طراحی کننده را در تعیین اصلاح سیستم و یا استراتژیهای بهره‌برداری برای جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ یاری می‌رساند.

ناپایداری ولتاژ در واقع یک پدیده دینامیکی است که می‌تواند از طریق شبیه‌سازیهای پایداری گذرا مطالعه شود با این حال اینگونه شبیه‌سازیها به راحتی اطلاعات مربوط به حساسیت پارامترها و درجه ناپایداری را تولید نمی‌کنند. از طرف دیگر اینگونه شبیه‌سازیهای دینامیکی به تحقیقات در زمینه فروپاشی ولتاژ در مواقع خاص جهت اقدامات حفاظتی محدود شده است.

تحلیل پایداری ولتاژ اغلب نیازمند بررسی طیف گسترده‌ای از شرایط سیستم و تعداد زیادی سناریوهای محتمل می‌باشند. برای چنین کاربردهایی روشهای مثبتی بر تحلیل حالت ماندگار مورد توجه بیشتر قرار

می گیرد. اینگونه تحلیلها اگر بررسی انجام شود دید مهندسی بسیار خوبی در زمینه رابطه ولتاژ / توان راکتیو در سیستم به همراه می آورد.

روشهای زیادی جهت تحلیل استاتیک پایداری ولتاژ ارائه شده است [۱۷ و ۱۸]. اما هیچ یک از این روشها در عمل توفیق چندانی نیافته است. و شرکت های برق برای تعیین سطوح فروپاشی ولتاژ در نقاط مختلف شبکه تمایل بیشتری به برنامه ای پخش بار متداول نشان داده اند. اما این برنامه ها علاوه بر پر زحمت بودن اطلاعات حساسیت مفیدی برای کاربردهای طراحی تولید نمی کنند.

برخی شرکتهای برق برای تعیین میزان نزدیکی به ناپایداری از منحنی های $Q-V$ در نقاط معدودی از باسهای بار در شبکه استفاده می کنند تا بر اساس حاشیه پایداری بدست آمده از این منحنی ها معیارهای کنترل سیستم را بدست آورند [۱۸]. یکی از مشکلات این روش این است که از قبل مشخص نیست که این منحنی ها برای کدام یک از باسها باید تولید شود. علاوه بر این در تولید منحنی های $Q-V$ ممکن است سیستم در همسایگی آن باس بیش از اندازه تحت استرس باشد و این امر بر روی نتایج بدست آمده تاثیر می گذارد. بعلاوه با متمرکز شدن بر روی تعدادی کمی باس مشکل اصلی سیستم ممکن است پنهان بماند.

یکی دیگر از روشهای تحلیل استاتیکی استفاده از تحلیل حساسیت $Q-V$ تحلیل بار تکه ای برای پیدا کردن حاشیه پایداری است که میزان تفاوت بار کلی بین یک شرایط کاری مشخص و نقطه فروپاشی ولتاژ را اندازه گیری می کند [۱۹]. ایراد اصلی این روش این است که حل های پخش بار خطی شده در نقاط نزدیک به فروپاشی ولتاژ ممکن است به اندازه کافی دقیق نباشد. بعلاوه اطلاعات حساسیت $Q-V$ برای مواقعی که بیشتر از یک ناحیه درگیر مسئله پایداری ولتاژ باشد، اطلاعات مفیدی نمی باشد.

اکثر روشهای ارائه شده تا به امروز برای بیان حالت ماندگار سیستم از مدل های پخش بار متداول استفاده می کنند. در مواقعی که سیستم به شرایط بحرانی نزدیک است این روشها ممکن است همیشه مناسب

نباشد و نیاز مبرمی در خصوص در نظر گرفتن مدل‌های دقیق تر حالت ماندگار برای اجزای کلیدی سیستم از جمله ژنراتورها، SVC ها، موتورهای القایی، بارهای وابسته به ولتاژ وجود دارد. بطور ویژه بررسی مشخصه های بار در نواحی فروپاشی ولتاژ از اهمیت کلیدی برخوردار هستند. با توضیحات بالا مشخص است که نیاز به یک ابزار تحلیلی که قادر به پیش بینی فروپاشی ولتاژ در شبکه پیچیده باشد و حاشیه های پایداری و حدود انتقال توان را بطور کمی اندازه گیری نماید و همچنین قادر به مشخص کردن نقاط ضعیف و مستعد فروپاشی ولتاژ باشد یک نیاز اساسی است.

۳-۴- شاخص های ارزیابی کمی پایداری ولتاژ سیستم قدرت

در تحلیل پایداری سیستم قدرت به دست آوردن نقاط بحرانی به تنهایی کافی نیست. نحوه تأثیر شرایط سیستم بر این نقاط بحرانی نیز دارای اهمیت می باشد. بدینوسیله به اطلاعاتی مرتبط با پارامترهای کنترلی دست یافت که در پایداری سیستم نقش مهمی بازی می کنند. هدف، بدست آوردن معیاری از فاصله نقطه کاری حاضر و نقطه کاری است که به عملکرد ناپایدار منجر می شود. هشدار اولیه نزدیک شدن به نقطه بحرانی است. آنالیز حساسیت قسمت عمده‌ای از این معیار را به همراه می آورد. ویژگیهای این معیار بستگی به عوامل مختلفی دارد. این معیار می تواند به فرم یک شاخص باشد. شاخصهای بسیار مختلفی امروزه مورد استفاده قرار می گیرند اما برای راحتی می توان آنها را به دو کلاس مختلف دسته بندی کرد. که در این قسمت توضیح داده خواهند شد [۲۰].

۳-۴-۱- شاخص های مبتنی بر حالت

این شاخص ها تنها از اطلاعات حالت کاری کنونی سیستم استفاده می کنند. نقطه کار به ازای یک شرایط پخش توان خاص محاسبه می شود. با استفاده از این اطلاعات مشخصه سیستم محاسبه شده و کلاس کاری تعیین می شود.

الف) ذخیره توان راکتیو

ذخیره توان راکتیو در نقاط موثر یک شاخص ساده، اما حساس برای امنیت ولتاژ به شمار می رود. این شاخص علاوه بر اینکه یک شاخص حالت پایه می باشد، می تواند نقش یک شاخص انحراف پایه را ایفا کند.

با فرض اینکه ناپایداری در حین رسیدن ژنراتورها به حدود جریان میدان و رسیدن SVC به حدود سوسپتانس اتفاق می افتد.

ب) افت ولتاژ

این شاخص بر اساس این قاعده استخراج شده اند که ولتاژ سیستم در حالت باگذاری افت می کند. با این حال در مواقعی این شاخص اثر ادوات جبران توان راکتیو و تپ ترانسفورماتور را می پوشاند.

ج) تلفات MW / MVAR

در هنگام نزدیک شدن به فروپاشی ولتاژ تلفات به شدت افزایش می یابد. این تلفات می تواند بعنوان شاخص ناپایداری ولتاژ مورد استفاده قرار گیرد.

د) مقادیر نموی

این شاخص ها اطلاعاتی از حالت های سیستم در نزدیکی نقطه کاری به همراه دارد یک معیار کمی جهت شناسایی نقاط ضعیف در شبکه تولید می کند. بعنوان مثال : شاخص $\Delta Q / \Delta V$ در مواقعی برای برآورد ناحیه های نزدیک به فروپاشی ولتاژ به کار می رود.

ه) حاشیه نموی حالت ماندگار

این شاخص از یک فرمول بندی خاص ماتریس ژاکوبین پخش بار سیستم محاسبه می شود. بعد از نرمالیزه کردن ماکزیمم مقدار شاخص ۱ خواهد بود که در شرایط بار بحرانی به صفر می رسد.

و) مینیمم مقدار یکتا^۱ یا مینیمم مقدار ویژه

مقادیر یکتا به واسطه تجزیه ماتریس های ژاکوبین در سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته اند. مقدار یکتا بطور مرسوم برای تعیین مرتبه یک ماتریس که برابر تعداد مقادیر یکتای غیر صفر ماتریس می باشد بکار می روند.

یک ماتریس حقیقی A را در نظر بگیرید. تجزیه مقدار یکتا (SVD) ماتریس A بصورت زیر می باشد :

$$A = QSP^T = \sum_{i=1}^n s_i q_i p_i^t \quad (1-3)$$

که S یک ماتریس قطری $n \times n$ با عناصر قطری $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ و Q و P ماتریس های نرمالیزه شده می باشند. ماتریس قطری S مقادیر یکتای A را در بر دارد. ستون های از ماتریس Q بردار های یکتای راست و $n \times n$ از ماتریس P بردار های یکتای چپ نامیده می شوند. با انتخاب مناسب Q, P مقادیر منفرد را بصورتی می توان مرتب کرد که داشته باشیم.

$$s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq 0 \quad (2-3)$$

برای یک ماتریس متقارن A ، مقادیر یکتای مجزا برابر جذر مربع مقادیر ویژه های AA^T یا $A^T A$ خواهند بود. بنابراین برای یک ماتریس متقارن حقیقی قدر مطلق مقادیر ویژه برابر مقادیر یکتا خواهند بود. اگر مینیمم مقادیر یکتا برابر صفر باشد ماتریس A منفرد خواهد بود.

کاربرد این مبحث در تحلیل پایداری ولتاژ استاتیک بر روی دیده بانی^۲ کوچکترین مقدار یکتا تا نقطه صفر می باشد. بنابراین در مطالعات پایداری ولتاژ مینیمم مقدار یکتا ماتریس ژاکوبین متناظر با حد بحرانی سیستم می باشد.

¹ Singular Value

² Monitoring

می توان مینیمم مقدار ویژه را بعنوان شاخص مورد استفاده قرار داد زیرا که این مقدار درست در زمانی که مینیمم مقدار یکتا به صفر می رسد برابر صفر خواهد بود.

۳-۴-۲- شاخص های مبتنی بر انحراف بزرگ

شاخص های انحراف پایه در مواقع ایجاد اثرات غیر خطی توسط اغتشاشات و یا افزایش بار مورد استفاده قرار می گیرند. این شاخص از نظر محاسباتی نسبت به شاخص های حالت، پایه غیر قابل دسترس تر اما قابل اطمینان تر می باشند. حاشیه پایداری در این شاخص ها معمولا بصورت ماکزیمم مقدار افزایش در توان اکتیو و یا راکتیو بارها و یا براساس افزایش آهسته بار از شرایط کاری عادی تعریف می شود. روشهایی که بر اساس شاخص های انحراف پایه می باشند معیارهای مشابه ای دارند اما تکنیک محاسبه در آنها متفاوت می باشند برخی از روشهای مهم در این زمینه عبارتند از:

الف) پخش بار تکراری^۱

ب) روشهای دنباله ای^۲

ج) روشهای مبتنی بر بهینه سازی^۳

د) روشهای مستقیم شناسایی نقاط فروپاشی

۳-۴-۳- مطالعات پایداری به وسیله تحلیل حساسیت

همانگونه که می دانیم مشخصات دینامیکی سیستم قدرت توسط ماتریس حالت بیان می شود. در عمل تنها نتایج پایداری بخشی از کار می باشند. تعیین عوامل مؤثر در پایداری ولتاژ نیز دارای اهمیت زیادی می باشند. این عوامل را بصورت پارمترهای مؤثر در عملکرد و پایداری سیستم می توان توصیف کرد. پارامترها هم در شرایط کاری و هم در شرایط غیر کاری قابل محاسبه هستند. هدف اصلی انجام تحلیل

¹ Iterative Load flow

² Continuation Methods

³ Optimization Based Methods

حساسیت برای تعریف یک شاخص پایداری و نحوه تأثیر پارامترهای سیستم بر این شاخص می باشد. با استفاده از تکنیک های حساسیت اطلاعات مفیدی در خصوص رابطه بین حالت های کنترلی و مستقل شبکه بدست می آید که این اطلاعات تنها در نزدیکی نقطه خطی سازی معتبر می باشند. در یک حالت کاری نرمال تحلیل حساسیت اطلاعات مربوط به تأثیر پارامترهای مختلف بر پایداری را تولید می کند. از این طریق اقدامات کنترلی مناسب برای جلوگیری از وقوع ناپایداری در سیستم می تواند بکار گرفته شوند.

۳-۴-۳-۱- تعریف پایداری ولتاژ از دید حساسیت Q-V

یک سیستم به ازای یک شرایط کاری مشخص پایداری است اگر به ازای هر باس سیستم، هرگاه توان راکتیو تزریقی در آن باس افزایش یابد، ولتاژ باس افزایش پیدا کند سیستم ناپایداری ولتاژ است اگر به ازای حداقل یک باس، با افزایش توان راکتیو تزریقی، اندازه ولتاژ کاهش یابد به عبارت دیگر یک سیستم از لحاظ ولتاژ پایدار است اگر حساسیت V نسبت به Q به ازای همه باسها مثبت باشد و اگر حداقل در یک باس این حساسیت منفی باشد سیستم ناپایدار ولتاژ است.

۳-۴-۳-۲- شناسایی عناصر حیاتی

شناسایی عناصر حیاتی شامل مکان یابی اجزای کلیدی، یک سیستم قدرت (باس ها، ژنراتور، شاخه ها) است که برای نگه داشتن پایداری ولتاژ نقش کلیدی را ایفا می کنند. به عبارت دیگر می بایست نقاط ضعیف در یک سیستم مشخص شوند. برای این منظور محققان روشهای مختلفی را ارائه کرده اند. در نزدیکی یک نقطه تعادل^۱ با پارامترهای (X_0, Y_0) از سیستم قدرت، مشتقات $\partial X / \partial P$ ، $\partial Y / \partial P$ مقادیر حساسیت محسوب می شوند. در اینجا P برداری است که می تواند شامل همه پارامترهای سیستم باشد. از طریق این مشتقات حساسیت متغیرهای وابسته به آسانی بدست می آید.

^۱ Equilibrium Point

۳-۳-۴-۳ حساسیت مقدار ویژه

همانگونه که می دانیم تحلیل مقادیر ویژه اطلاعاتی در خصوص پایداری سیگنال کوچک را در نقطه کاری کنونی به همراه دارد. فرض کنید که λ_i یک مقدار ویژه دلخواه باشد. حساسیت آن نسبت به پارامتر دلخواه P برابر است با [۲۱]:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial p} = \frac{v_i^T \frac{\partial A_{sys}}{\partial p} u_i}{v_i^T u_i} \quad (3-3)$$

که u_i و v_j به ترتیب بردارهای ویژه متناظر با λ_i از ماتریس A_{sys} می باشند. حساسیت مقدار ویژه را بر هر مقدار ویژه دلخواهی می توان اعمال کرد. بنابراین ناپایداری های نوسانی را نیز با این روش می توان بررسی کرد. برای تحلیل فروپاشی این روش را می بایست به کوچکترین مقدار ویژه (λ_{min}) اعمال کرد.

۳-۴-۴-۳ حساسیت های کمی^۱ و کیفی^۲

حساسیت های کمی آن دسته از حساسیت هایی هستند که تنها جهت و مقدار نسبی تغییر شاخص پایداری را تحت تغییرات پارامترها مشخص می کنند. حساسیت کمی می تواند برای کمی سازی تغییر شاخص پایداری با توجه به تغییرات پارامترها بکار رود. یک مثال خوب برای حساسیت کمی، حساسیت مقدار ویژه می باشد. در یک نقطه کاری $\frac{\partial \lambda_i}{\partial p}$ اطلاعات کیفی در مورد تاثیر پارامتر بر روی مقدار ویژه را در بردارد. زیرا که مقدار ویژه یک تابع کاملاً غیر خطی از پارامترهای سیستم است [۹] و در عمل تخمین کمی تغییر مقدار ویژه نسبت به تغییرات پارامترها کاری غیر ممکن است. بطور مشابه حساسیت های مبتنی بر تحلیل مدال اطلاعات کیفی مربوط به پایداری را تولید می کند. در فصول بعد نشان داده خواهد شد که با استفاده از روش های جدیدی همچون روش فرم نرمال می توان اطلاعات دقیق تری از سیستم را در صورت زیاد بودن اثرات غیرخطی بدست آورد.

¹ Quantitative

² Qualitative

۳-۵- تحلیل مدال^۱ برای ارزیابی پایداری ولتاژ

روش تحلیل مدال شامل محاسبه تعدادی از مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین کاهش یافته سیستم می شود که روابط Q-V و مشخصه های ژنراتورها، بارها، ادوات جبران سازی را در شبکه توضیح می دهد. این بحث موازی با بحث تحلیل مدال در مطالعات پایداری سیگنال کوچک است و از تعاریف مشابهی استفاده می کند.

۳-۵-۱- ماتریس ژاکوبین کاهش یافته

معادلات ولتاژ - توان خطی شده حالت ماندگار سیستم بصورت زیر است [۱۶]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (۴-۳)$$

ΔP : تغییر نموی در توان اکتیو باس

ΔQ : تغییر نموی در توان راکتیو باس

$\Delta \theta$: تغییر نموی در زاویه باس

ΔV : تغییر نموی در ولتاژ باس

اگر مدل پخش بار متداول برای تحلیل ولتاژ مورد استفاده قرار گیرد، ماتریس ژاکوبین (۴-۳) مشابه ماتریس ژاکوبین استفاده شده در حل معادلات به شیوه نیوتن - رافسون می باشد. در صورت وجود ادوات دیگر (مانند SVC) در سیستم، ماتریس ژاکوبین سیستم باید اصلاح شود.

با توجه به ارتباط قوی بین ΔV و ΔQ و ارتباط ضعیف بین ΔV و ΔP در تحلیل سیگنال کوچک متداول است که P را ثابت در نظر می گیرند. این امر مشابه روش منحنی های Q-V می باشد. علیرغم اینکه تغییرات نموی P در فرمولها وارد نمی شود، تأثیر تغییر در توان سیستم و یا توان انتقالی با مطالعه رابطه بین Q و V در شرایط کاری مختلف در محاسبات وارد می شود.

^۱ Modal Analysis

$$\Delta P = 0 \quad \text{برای کاهش مرتبه (۳-۴)}$$

پس داریم :

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta} J^{-1}_{P\theta} J_{PV}] \Delta V = J_R \Delta V \quad (۳-۵)$$

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (۳-۶)$$

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J^{-1}_{P\theta} J_{PV}] \quad (۳-۷)$$

J_R را ماتریس ژاکوبین کاهش یافته سیستم می نامند. این ماتریس رابطه مستقیم بین اندازه ولتاژ باس و توان راکتیو تزریق شده در آن را نشان می دهد. در تحلیل مدال پایداری ولتاژ همچنین می توان از ماتریس ژاکوبین اصلی سیستم استفاده کرد. در این صورت روابط بین (ΔV و $\Delta \theta$) و (ΔQ و ΔP) بطور یکجا بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد. از آنجاییکه $\Delta \theta$ در فرمولها وارد می شود، جداسازی و تشخیص رابطه بین ΔV با (ΔQ و ΔP) که برای تحلیل پایداری اهمیت زیادی دارد کاری دشوار است. علاوه بر این انجام محاسبات بر روی ماتریس ژاکوبین اصلی نسبت به ماتریس ژاکوبین کاهش یافته وقت گیر و سخت تر است. پس به این دلیل در تحلیل مدال بیشتر از ماتریس ژاکوبین کاهش یافته استفاده می شود. در واقع هدف استفاده از ماتریس ژاکوبین کاهش یافته به جای ماتریس حالت سیستم تمرکز اصلی بر روی مشخصه های ولتاژ و توان راکتیو می باشد.

مقادیر ویژه ژاکوبین مدهایی را که از طریق آن سیستم می تواند ناپایدار شود را مشخص می کند. اندازه این مقدار ویژه می تواند معیاری نسبی جهت نزدیکی به ناپایداری باشد. از طرف دیگر بردارهای ویژه اطلاعاتی در خصوص مکانیزم از دست رفتن پایداری ولتاژ در خود دارند. در ادامه به این موضوع بیشتر پرداخته خواهد شد.

۳-۵-۲- مدهای ناپایداری ولتاژ

فرض کنید

$$J_R = U \Lambda V \quad (۸-۳)$$

U : ماتریس مدال راست J_R که

V : ماتریس مدال چپ J_R

Λ : ماتریس قطری مقادیر ویژه J_R

و

$$J_R^{-1} = U \Lambda^{-1} V \quad (۹-۳)$$

از (۹-۳) داریم

$$\Delta V = U \Lambda^{-1} V \Delta Q \quad (۱۰-۳)$$

و یا

$$\Delta V = \sum_i \frac{U_i V_i}{\lambda_i} \Delta Q \quad (۱۱-۳)$$

که U_i ، i امین بردار ویژه راست و V_i سطر i ام بردار ویژه چپ J_R می باشد.

در اینجا از تحلیلی مشابه تحلیل خطی دینامیکی سیستم استفاده می شود. هر مقدار ویژه λ_i به همراه

بردارهای ویژه چپ و راست متناظر با آن یک مد i برای سیستم تعریف می کنند.

تغییرات مدال توان راکتیو برابر است با

$$\Delta Q_{mi} = k_i U_i \quad (۱۲-۳)$$

که

$$k_i^2 \sum_j U_{ji}^2 = 1 \quad (13-3)$$

تغییرات مدال ولتاژ برابر است با :

$$\Delta V_{mi} = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q_{mi} \quad (14-3)$$

همانگونه که می بینید هنگامیکه تغییرات توان راکتیو در جهت بردار U_i باشد، تغییرات ولتاژ نیز در همان جهت است. علاوه براین اندازه هر مقدار ویژه λ_i میزان ناتوانی ولتاژ مدال متناظر با آن را نشان می دهد.

اگر $\lambda_i = 0$ شود، ولتاژ مدال i ام دستخوش فروپاشی می شود. زیرا که هرگونه تغییر در توان راکتیو مدال باعث تغیی نامتناهی در ولتاژ مدال می شود.

در رابطه (۱۱-۳) فرض کنید $\Delta Q = e_k$ که همه عناصر e_k بجز عنصر k ام برابر ۱ است. در نتیجه :

$$\Delta V = \sum_i \frac{V_{ik} U_i}{\lambda_i} \quad (15-3)$$

بنابراین حساسیت V-Q در باس k برابر است با :

$$\frac{\Delta V_k}{\Delta Q_k} = \sum_i \frac{U_{ki} V_{ik}}{\lambda_i} = \sum_i \frac{P_{ki}}{\lambda_i} \quad (16-3)$$

سیستم از لحاظ ولتاژ پایدار است اگر همه مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین مثبت باشند. اگر سیستم تحت استرس باشد، مقادیر ویژه J_R کوچک می شوند تا آنجا که به نقطه بحرانی پایداری ولتاژ سیستم می رسند و در نهایت یکی از مقادیر ویژه J_R صفر می شود.

اگر برخی از مقادیر ویژه J_R منفی باشند سیستم از نقطه بحرانی پایداری ولتاژ عبور کرده است. چرا که مقادیر ویژه با افزایش استرس بطور پیوسته از مثبت به صفر و سپس به منفی تغییر می کنند [۱۵].

گرچه اندازه مقادیر ویژه J_R معیاری جهت تعیین نزدیکی به نقطه ناپایداری محسوب می شوند، به دلیل غیر خطی بودن مسئله معیاری مطلق نمی باشد. این معیار، مشابه ضریب میرایی در تحلیل پایداری

سیگنال کوچک است^۱ که درجه میرایی را نشان می دهد اما معیار مطلق حاشیه پایداری نمی باشد. برای بدست آوردن فاصله توانی ناپایداری ولتاژ با افزایش بار سیستم باید تحلیل مدال را تا رسیدن به نقطه ناپایداری انجام داد. کاربرد تحلیل مدال در این است که مشخص می کند چه مقدار توان یا بار می تواند اضافه شود و همچنین نواحی بحرانی در ناپایداری ولتاژ را مشخص می کند و علاوه بر این مکانیزم ناپایداری و میزان مشارکت ادوات سیستم را در هر مد توضیح می دهد.

۳-۵-۳- ضریب مشارکت باس

ضریب مشارکت باس k در مد i ام بصورت زیر تعریف می شود [۱۰]:

$$P_{ki} = U_{ki} V_{ik} \quad (۱۷-۳)$$

از رابطه (۳-۱۳) مقدار P_{ki} مقدار مشارکت، مقدار ویژه i ام را در حساسیت $V-Q$ باس k مشخص می کند. ضرایب مشارکت به ازای مقادیر ویژه کوچک سیستم مناطق نزدیک به ناپایداری ولتاژ را مشخص می کند.

۳-۶- مدل سازی بار در سیستم قدرت

عملکرد پایدار سیستم قدرت مستلزم توانایی تطبیق خروجی واحدهای تولیدی با بارهای سیستم می باشد. در نتیجه مشخصه های بار تاثیر مهمی بر پایداری سیستم دارند. مدلسازی بار یک کار پیچیده است چرا که باس بار معمولی در مطالعات پایداری از تعداد زیادی ادوات از قبیل لامپ های مهتابی و التهابی، یخچالها، گرمکن ها، کمپرسورها و موتورها تشکیل شده است. تخمین دقیق میزان مشارکت هر کدام از این انواع بار در یک باس کاری مشکل است. علاوه بر این این ترکیب بار بسته به عوامل مختلفی همچون زمان، شرایط آب و هوایی و شرایط اقتصادی دستخوش تغییر می شود.

^۱ Small Signal Stability Analysis

حتی اگر ترکیب بارها به طور دقیق مشخص باشد، نمایش همه آنها که معمولاً شامل چند میلیون از ادوات مختلف می شود. در یک سیستم قدرت غیر عملی می باشد. بنابراین نمایش بار در مطالعات سیستم مبنی بر ساده سازی های قابل ملاحظه است.

در این بخش در مورد مفاهیم پایه مدلسازی بار، ترکیب بارها و بدست آوردن پارامترهای مدل بار بحث خواهد شد [۲۲].

۳-۶-۱- مفاهیم پایه مدلسازی بار

شیوه متداول در مطالعات پایداری و پخش بار سیستم قدرت بیان و نمایش مشخصه ترکیبی بار از دید نقطه تحویل توان مجتمع می باشد. بار در یک پست انتقال (باس A) علاوه بر ادوات منتقل شده به آن شامل اثر ترانسفورماتورهای کاهنده، فیدرهای توزیع، ترانسفورماتورهای توزیع، تنظیم کننده های ولتاژ و ادوات جبران ساز توان راکتیو می باشد. مدل های بار به طور مرسوم به دو دسته تقسیم می شوند: مدل های استاتیکی و مدل های دینامیکی

۳-۶-۲- مدل های استاتیکی بار

یک مدل استاتیکی بار مشخصه بار را در هر لحظه از زمان بعنوان توابع جبری از اندازه ولتاژ باس و فرکانس در آن لحظه بیان می کند [۲۰]. مؤلفه توان راکتیو و مؤلفه توان راکتیو Q بطور جداگانه در نظر گرفته می شوند.

وابستگی مشخصه بار به ولتاژ معمولاً با مدل نمایی بیان می شود.

$$P = P_0 (\bar{V})^a \quad (18-3)$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^b$$

در این مدل و مدل های دیگر این بخش داریم:

$$V = \frac{V}{V_0} \quad (19-3)$$

که P و Q به ترتیب مؤلفه های توان اکتیو و راکتیو بار در زمانی که ولتاژ باس V است، می باشند.

پانویس 0 نماینگر مقدار متغیرها در شرایط اولیه کاری می باشد.

پارامترهای این مدل توانهای a و b می باشند. با مقادیر 0، 1، 2 این پارامترها مدل بار به ترتیب به صورت

و توان ثابت، جریان ثابت و یا امپدانس ثابت نمایش داده می شود. برای بارهای ترکیبی این مقادیر بستگی

به مشخصه ترکیبی مؤلفه های بار دارد. توان a برابر با شیب $\frac{\partial P}{\partial V}$ و توان b برابر با شیب $\frac{\partial Q}{\partial V}$ در $V=V_0$

می باشد. برای بارهای ترکیبی سیستم توان a در محدوده 0/5 تا 1/8 و توان b در محدوده 1/5 تا 2 قرار

می گیرد. یک مشخصه مهم توان b این است که بعنوان تابعی غیر خطی از ولتاژ تغییر می کند. این امر از

اشباع مغناطیسی ترانسفورماتورهای توزیع و موتورهای ناشی می شود. در ولتاژهای بالاتر مقدار Q به مراتب

بالاتر می باشد.

در صورت نبودن این اطلاعات خاص، مدل استاتیک پذیرفته شده و مرسوم نمایش توان اکتیو بصورت

جریان ثابت ($a=1$) و توان راکتیو بصورت امپدانس ثابت ($b=1$) می باشد.

یک مدل دیگر که بطور گسترده برای بیان بار به ولتاژ مورد استفاده قرار می گیرد مدل چند جمله ای می

باشد.

$$P = P_0[p_1\bar{V}^2 + p_2\bar{V} + p_3] \quad (20-3)$$

$$Q = Q_0[q_1\bar{V}^2 + q_2\bar{V} + q_3]$$

این مدل تحت عنوان مدل ZIP شناخته می شود و شامل مؤلفه های امپدانس ثابت (Z)، جریان ثابت (I)

و توان ثابت (P) می باشد. پارامترهای مدل، ضرایب p_1 تا p_3 و q_1 تا q_3 می باشد که سهم هر مؤلفه را

تعیین می کنند.

وابستگی مشخصه بار به فرکانس با ضرب مدل یا مدل چند جمله ای در یک ضریب بصورت زیر بیان می

شود :

$$P = P_0(\bar{V})^a(1 + K_{pf}\Delta f) \quad (21-3)$$

$$Q = Q_0(\bar{V})^b(1 + K_{qf}\Delta f)$$

$$P = P_0[p_1\bar{V}^2 + p_2\bar{V} + p_3](1 + K_{pf}\Delta f) \quad (22-3)$$

$$Q = Q_0[q_1\bar{V}^2 + q_2\bar{V} + q_3](1 + K_{qf}\Delta f)$$

که Δf انحراف فرکانس ($f - f_0$) می باشد. K_{pf} معمولاً در گستره ۰ تا ۳ و K_{qf} در گستره ۲- تا صفر متغیر هستند. فرکانس باس معمولاً در مدل سیستم مورد استفاده در تحلیل پایداری متغیر حالت نمی باشد. بنابراین این مقدار از محاسبه مشتق زمانی زاویه ولتاژ باس قابل دستیابی است.

یک مدل استاتیک جامع تر که شامل همه اشکال مختلف مدلسازی می شود بصورت زیر است :

$$P = P_0(P_{ZIP} + P_{EX1} + P_{EX2}) \quad (23-3)$$

$$P_{ZIP} = p_1\bar{V}^2 + p_2\bar{V} + p_3 \quad (24-3)$$

$$P_{EX1} = p_4\bar{V}^{a1}(1 + K_{pf1}\Delta f)$$

$$P_{EX2} = p_5\bar{V}^{a2}(1 + K_{pf2}\Delta f)$$

عبارت مربوط به مؤلفه های توان راکتیو ساختار مشابه دارد. جبرانسازی توان راکتیو بار به صورت جداگانه مدل سازی می شود.

مدلهای ارائه شده توسط معادلات (۱۸-۳) تا (۲۴-۳) در مقادیر ولتاژ کم قابل استفاده نیستند و ممکن است باعث به وجود آمدن مشکلات محاسباتی منجر شوند [۲۰]. بنابراین برنامه های پایداری در مواقعی که ولتاژ باس به کمتر از یک مقدار مشخص افت می کند، مشخصه بار را به یک مدل امپدانس ثابت تغییر می دهند. بعنوان مثال در مدل بار استفاده شده در برنامه ها توان های a_1, a_2, b_1, b_2 در صورت رسیدن ولتاژ به یک مقدار آستانه تغییر می کنند و مؤلفه های توان ثابت و جریان ثابت به مؤلفه های امپدانس ثابت تبدیل می شوند.

۳-۷- مدل سازی SVC در مطالعات پایداری ولتاژ

سیستم های قدرت به هم پیوسته همیشه در معرض اغتشاشات و خطاهای ناشی از حوادث غیر مترقبه گوناگون می باشند. مقدار توان عبوری یک خط انتقال با داشتن مقادیر توان های تزریقی مشخص در نقاط مختلف شبکه تعیین می شود. بارهای سیستم قدرت بطور کلی در زمان متغیر هستند و همچنین متأثر از تغییرات آب و هوایی و دیگر عوامل غیر قابل پیش بینی دیگر می باشند. بنابراین توان عبوری از یک خط انتقال تحت شرایط نرمال و حالت ماندگار می تواند متغیر باشد. وقوع یک پیشامد (ناشی از قطع شدن یک خط، ژنراتور) می تواند منجر به کاهش/افزایش ناگهانی در جریان عبور خط شود. این امر باعث اضافه ولتاژ در برخی از خطوط و در نتیجه ایجاد خطر برای امنیت سیستم می شود.

یک اغتشاش بزرگ همچنین می تواند منجر به ایجاد نوسانات روتور ژنراتور شود که در نتیجه باعث نوسان در مقدار توان انتقالی خطوط می شود. افزایش بارگذاری خطوط انتقال در برخی موارد می تواند منجر به فروپاشی ولتاژ ناشی از کمبود توان راکتیو تحویلی در مراکز بار شود که این امر متأثر از مصرف بالای توان راکتیو در خطوط انتقال و مشخصه های بار می باشد [۲۳].

عوامل ذکر شده در بالا به مشکلات پیش روی در زمینه بهره برداری ایمن و اقتصادی سیستم های بزرگ اشاره می کند. این مشکلات می تواند با ایجاد حاشیه های مطمئن (در انتقال توان) مرتفع گردد. این امر مستلزم کنترل دینامیکی سریع توان های اکتیو و راکتیو با استفاده از کنترل کننده های الکترونیکی توان بالا می باشد.

کنترل کننده FACTS به عنوان یک سیستم الکترونیک قدرت که توانایی کنترل یک یا چند پارامتر از سیستم انتقال AC را داراست تعریف می شود. کنترل کننده های FACTS از لحاظ نحوه قرار گرفتن در شبکه بصورت زیر دسته بندی می شوند:

- کنترل کننده های موازی

- کنترل کننده های سری
- کنترل کننده های سری-موازی

از نظر ادوات الکترونیکی به کار رفته در کنترل، این کنترل کننده ها به صورت های زیر می باشند:

- نوع امپدانس متغیر
- مبدل های مبتنی بر منبع ولتاژ
- نوع امپدانس متغیر شامل موارد زیر است:
- جبران ساز استاتیک توان راکتیو (SVC)
- جبران ساز تریستوری سری (TCSC)
- ترانسفورماتور تغییر فاز تریستوری (TCPST)

کنترل کننده های مبتنی بر منبع ولتاژ شامل موارد زیر می باشند:

- جبران ساز استاتیک سنکرون (STATCOM)
- جبران ساز استاتیک سنکرون سری (SSSC)
- کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)

انواع دیگری از ادوات FACTS وجود دارد که کاربرد کمتری دارند. جبران کننده های توان راکتیو (SVC) قدیمی ترین کنترل کننده FACTS محسوب می شود که در ابتدا در صنعت فولاد و در کوره های قوس الکتریکی بکار گرفته شد. هدف از کاربرد آن در این زمینه بهبود ضریب توان دینامیکی و متعادل کردن جریان های سمت منبع بوده است. سابقه کاربردهای آن در سیستم قدرت به چند دهه اخیر باز می گردد که بطور عمده به منظور بر آورده ساختن نیازهای زیر می باشد [۲۴].

- افزایش قابلیت انتقال توان در خطوط بلند

- بهبود پایداری ولتاژ با تنظیم ولتاژ سریع
- میرا کردن نوسانات فرکانس پایین ناشی از مدهای نوسانی روتور
- میرا کردن نوسانات زیر سنکرون ناشی از مدهای پیچشی روتور
- کنترل اضافه ولتاژ های دینامیکی

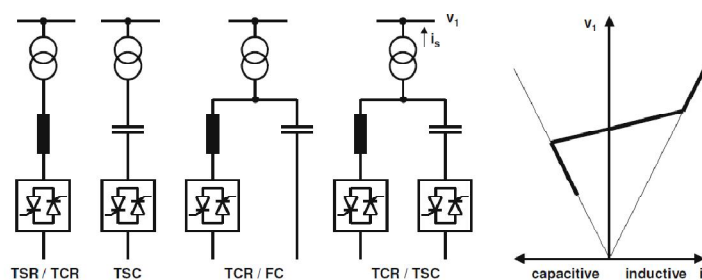
این پروژه بر روی کاربرد SVC در تنظیم ولتاژ شبکه به منظور بهبود پایداری ولتاژ متمرکز شده است. در ادامه به نحوه مدلسازی SVC در مطالعه پایداری ولتاژ استاتیک سیستم و توضیح مشخصه های دینامیکی و استاتیکی آن و نحوه کنترل ولتاژ آن پرداخته خواهد شد.

۳-۸- معرفی ساختمان SVC

بارهای الکتریکی توان راکتیو را تولید و یا مصرف می کنند. از آنجائیکه توان انتقالی به طور قابل ملاحظه ای از لحظه ای به لحظه دیگر در حال تغییر است، تعادل توان راکتیو در یک شبکه نیز دائماً در حال تغییر است. نتیجه این امر می تواند تغییرات غیر قابل قبول اندازه ولتاژ و یا حتی افت ولتاژ و در بدترین حالت فروپاشی ولتاژ باشد. یک جبران کننده استاتیک توان راکتیو (SVC) قادر است به طور پیوسته توان راکتیو مورد نیاز برای کنترل نوسانات دینامیکی ولتاژ را در شرایط مختلف سیستم تأمین کرده و به این وسیله باعث بهبود پایداری انتقال و توزیع سیستم گردد. نصب SVC در یک یا چند نقطه مناسب در شبکه قابلیت انتقال را افزایش و تلفات را کاهش می دهد و یک سطح ولتاژ هموار را به ازای شرایط کاری مختلف شبکه فراهم می آورد. به علاوه یک SVC قادر است با تنظیم مناسب ولتاژ از نوسانات توان راکتیو نیز جلوگیری نماید.

ساختمان SVC متشکل از تعدادی اجزای بهم پیوسته است که مهمترین آن ها شیر تریستوری است که از دو تریستور موازی-معکوس کنترل شده تشکیل شده است. راکتورهای هسته هوایی و خازن های ولتاژ بالای AC دیگر اجزای تشکیل دهنده آن می باشند. این تجهیزات از طریق یک ترانسفورماتور قدرت به

شبکه متصل می شوند. به طور ساده مدار SVC شامل خازن ها و راکتورهای کلیدزنی شده توسط تریستور می باشد. با کنترل هماهنگ این مجموعه می توان توان راکتیو SVC را تغییر داد (شکل (۳-۱)). اولین تجاری SVC در سال 1972 برای یک کوره قوس الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. از آن زمان به بعد SVC در بین ادوات FACTS مقبول ترین و پر کاربرد ترین می باشد.



شکل (۳-۱): ساختارهای مختلف SVC / مشخصه ساده ولتاژ-جریان [۲۴]

۳-۹-۹- مدل سازی SVC در مطالعات استاتیکی سیستم قدرت

در این قسمت نحوه مدل سازی SVC در مطالعه حالت ماندگار سیستم قدرت و به خصوص مطالعات پخش بار شبکه توضیح داده خواهد شد. از آنجاکه SVC از دسته ادوات تریستور کنترلی می باشد در مدل سازی آن از مدل یک راکتور کنترل شده تریستوری^۱ استفاده خواهد شد.

۳-۹-۱- استخراج روابط مداری SVC

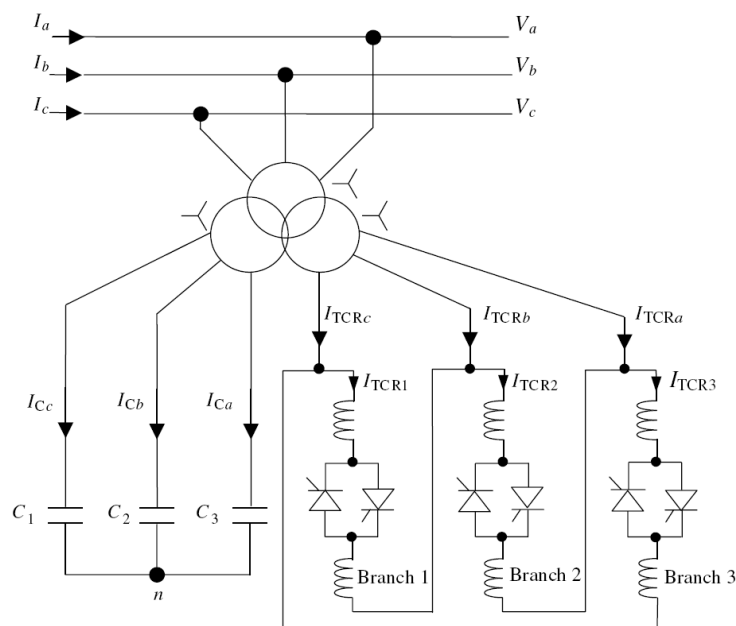
در ساده ترین شکل ، SVC از یک راکتور تریستوری کنترل شده^۲ موازی با بانک خازنی تشکیل شده است (شکل (۳-۳)). از نظر عملیاتی SVC همچون یک راکتانس متغیر با اتصال موازی رفتار می کند که برای تنظیم اندازه ولتاژ در نقطه اتصال به شبکه ، توان راکتیو را تولید و یا جذب می کند . از SVC بعنوان

^۱ TCR

^۲ Thyristor Controlled Reactor

جبران‌ساز سریع توان راکتیو یا تنظیم کننده سریع ولتاژ استفاده می شود . کنترل زاویه آتش باعث می شود پاسخ SVC تقریباً آنی باشد .

در آرایش نشان داده شده در شکل (۲-۳) برای اتصال SVC به باس ولتاژ بالا از ترانسفورماتور سه فاز استفاده شده است. این ترانسفورماتور دو ثانویه مجزا دارد. یکی برای اتصال مثلث TCR شش پالسه و دیگری برای اتصال ستاره بانک خازنی سه فاز که نقطه میانی زمین نشده می باشد. طرف فشار قوی نیز دارای اتصال ستاره شناور می باشد.



شکل (۲-۳). نمای یک SVC شامل خازن‌های ثابت و راکتورهای تریستور کنترلی [۲۵].

برای بدست آوردن ادمیتانس SVC باید ادمیتانس TCR و بانک خازنی را با هم ترکیب کرد .

ادمیتانس TCR از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$B_{TCR} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\omega L \pi} \quad (۲۵-۴)$$

اگر فرض شود که در کلی ترین حالت $B_{C1} \neq B_{C2} \neq B_{C3}$ مدل کاهش یافته بانک خازنی برابر است با :

$$\begin{bmatrix} I_{Ca} \\ I_{Cb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j \left(B_{C1} - \frac{B_{C1}^2}{\Delta B_C} \right) & -j \frac{B_{C2} B_{C1}}{\Delta B_C} & -j \frac{B_{C3} B_{C1}}{\Delta B_C} \\ -j \frac{B_{C1} B_{C2}}{\Delta B_C} & j \left(B_{C2} - \frac{B_{C2}^2}{\Delta B_C} \right) & -j \frac{B_{C3} B_{C2}}{\Delta B_C} \\ -j \frac{B_{C1} B_{C3}}{\Delta B_C} & -j \frac{B_{C2} B_{C3}}{\Delta B_C} & j \left(B_{C3} - \frac{B_{C3}^2}{\Delta B_C} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (26-3)$$

که در آن

$$\left. \begin{aligned} \Delta B &= B_{C1} + B_{C2} + B_{C3} \\ B_{C1} &= \omega C_1 \\ B_{C2} &= \omega C_2 \\ B_{C3} &= \omega C_3 \end{aligned} \right\} \quad (27-3)$$

اگر هر سه شاخه بانک خازنی سوسپیتانس معادل یکسانی داشته باشند ($B_{C1} = B_{C2} = B_{C3}$) رابطه قبل به صورت زیر در می آید .

$$\begin{bmatrix} I_{Ca} \\ I_{Cb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} j2B_C & -jB_C & -jB_C \\ -jB_C & j2B_C & -jB_C \\ -jB_C & -jB_C & j2B_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (28-3)$$

با ترکیب شاخه TCR و بانک خازنی و اعمال ماتریس توالی جریان و ولتاژ به رابطه قبل رابطه زیر به دست می آید :

$$\begin{bmatrix} I_{SVC(0)} \\ I_{SVC(1)} \\ I_{SVC(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & j(B_C - B_{TCR}) & 0 \\ 0 & 0 & j(B_C - B_{TCR}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{(0)} \\ V_{(1)} \\ V_{(2)} \end{bmatrix} \quad (28-3)$$

برای حالت عملکرد متقارن و متعادل SVC تنها توالی مثبت مد نظر می باشد .

$$I_{SVC(1)} = jB_{SVC} V_{(1)} \quad (29-3)$$

که

$$\left. \begin{aligned}
 B_{SVC} &= B_C - B_{TCR} = \frac{1}{X_C X_L} \left\{ X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)] \right\} \\
 X_L &= \omega L \\
 X_C &= \frac{1}{\omega C}
 \end{aligned} \right\}$$

۳-۹-۲- مدلهای متداول پخش بار SVC

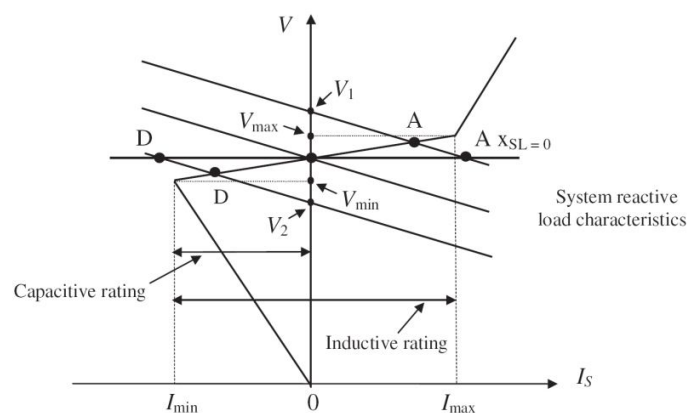
مدلهای پخش بار متداول SVC را به عنوان یک ژنراتور پشت یک راکتانس در نظر می گیرند [۲۶]. راکتانس این مدل بیانگر مشخصه تنظیم ولتاژ SVC می باشد. نمایش ساده تر این است که شیب SVC صفر در نظر گرفته شود. این فرض تا زمانی که SVC در حدود طراحی شده کار می کند می تواند معتبر باشد. این نقطه در شکل (۳-۳) نمایش داده شده است. در صورتیکه مشخصه بار بالایی مد نظر باشد، اگر شیب SVC صفر در نظر گرفته نشود، ژنراتور از حد مینیمم در نقطه $A_{X_{SL}=0}$ خارج خواهد شد، اما اگر شیب SVC در نظر گرفته شود، ژنراتور از حدود طراحی شده خارج نشده و در نقطه A کار می کند. دلیل در نظر گرفتن شیب^۱ ولتاژ- جریان SVC در مطالعات پخش بار نیز همین موضوع می باشد. شیب SVC را می توان با اتصال مدل ژنراتوری SVC به یک باس کمکی از طریق یک راکتانس القایی شامل راکتانس ترانسفورماتور و شیب SVC مدل کرد. در این صورت باس کمکی بعنوان یک باس PV و باس ولتاژ بالا یک باس PQ را در نظر گرفته می شود [۲۳]. این مدل در شکل (۳-۵-a) نمایش داده شده است. ترانسفورماتور کوپلینگ می تواند همانگونه که در شکل (۳-۵-b) نمایش داده شده، بصورت جداگانه مدل شود.

این دو مدل برای عملکرد SVC خارج از محدوده کنترلی شده مناسب نمی باشند. در اینگونه موارد SVC را باید بصورت یک سوسپیتانس راکتیو ثابت مطابق زیر مدل کرد :

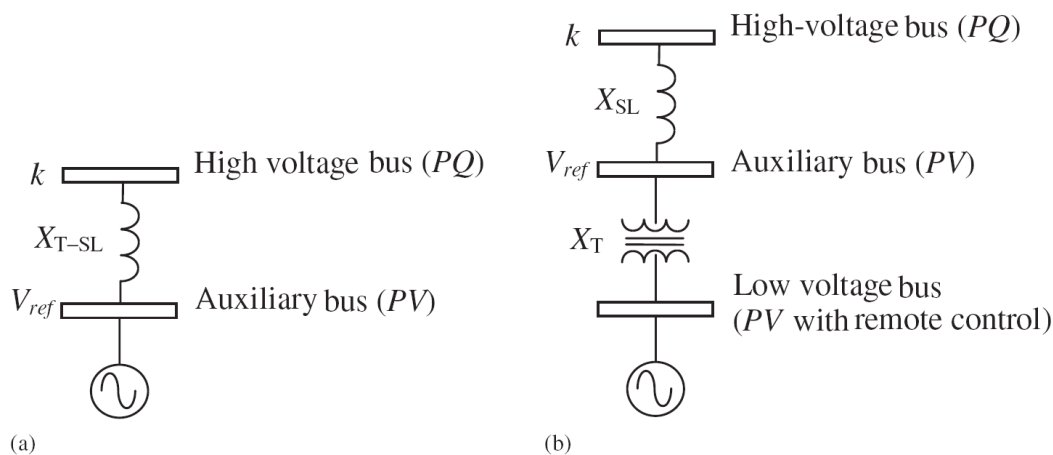
^۱ Slope

$$B_{SVC} = -\frac{Q_{lim}}{V_{SVC}^2} \quad (3-30)$$

در این حالت در نتیجه خارج شدن از حد توان راکتیو Q_{lim} ، SVC بصورت ولتاژ آزاد کار می کند . مدل ترکیبی سوسپتانس - ژنراتور می تواند نتایج دقیق به همراه داشته باشد. اما مشکل اصلی این مدلسازی در این است که دو مدل از تعداد متفاوتی باس استفاده می کنند. مدل ژنراتوری از ۲ یا ۳ باس استفاده می کند در حالیکه در مدل سوسپتانس ثابت تنها از یک باس استفاده شده است [۲۷]. در مطالعات پخش بار بوسیله روش نیوتن - رافسون این امر در زمان انجام محاسبات تکراری بر روی ماتریس ژاکوبین مشکل آفرین می باشد. بعلاوه در طول محاسبات در هر مرحله بایستی موضوع خارج شدن SVC از حدود طراحی بررسی شود.



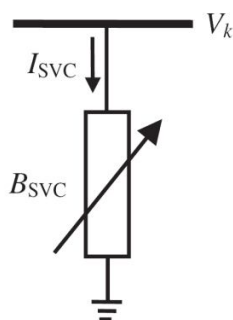
شکل (۳-۳). مشخصه ولتاژ- جریان سیستم قدرت و SVC [۲۴]



شکل (۳-۴). مدل‌های متداول پخش بار SVC [۲۵]. (الف) مدل شیب (ب) مدل شیب و ترانسفورماتور

۳-۹-۳- مدل سوسپیتانس موازی متغیر

SVC را می‌توان بصورت یک راکتانس قابل تنظیم که دارای حدود زاویه آتش و راکتانس می‌باشد مدلسازی کرد. مدار معادل این مدل در شکل (۴-۵) نمایش داده شده است. این مدار معادل برای استخراج معادلات خطی شده لازم در الگوریتم نیوتن-رافسون از روی معادلات توان غیر خطی SVC مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵].



شکل (۳-۵). مدل سوسپیتانس متغیر [۲۵]

با توجه به شکل (۳-۵) جریان کشیده شده توسط SVC برابر است با :

$$I_{SVC} = jB_{SVC} V_k \quad (31-3)$$

توان راکتیو تزریقی در باس k برابر است با :

$$Q_{SVC} = Q_k = -V_k^2 B_{SVC} \quad (32-3)$$

در معادله خطی شده (33-3) سوسپتانس معادل B_{SVC} بعنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده است. پس هدف پیدا کردن مقدار سوسپتانس SVC (و محاسبه زاویه آتش تنظیمی) است به نحوی که اندازه ولتاژ باس (V_k) در محدوده کنترل شده باقی بماند. برای محاسبه B_{SVC} روابط زیر باید به معادلات پخش بار سیستم اضافه گردد.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_k \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta B_{SVC} / B_{SVC} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (33-3)$$

که θ_k زاویه ولتاژ باس k می باشد. در انتهای تکرار i ام ، سوسپتانس موازی B_{SVC} با فرمول زیر اصلاح می شود :

$$B_{SVC}^{(i)} = B_{SVC}^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC}} \right)^{(i)} B_{SVC}^{(i-1)} \quad (34-4)$$

بعد از محاسبه سطح جبرانسازی از طریق محاسبه سوسپتانس، زاویه آتش ترستورها را می توان محاسبه کرد . برای محاسبه زاویه آتش نیاز به یک حل تکراری دیگر داریم زیرا سوسپتانس SVC و زاویه آتش بصورت یک معادله غیر خطی به هم مرتبط هستند.

۳-۹-۴- مدل زاویه آتش

این مدل برای از بین بردن محاسبات تکرار اضافه در مدل قبلی ارائه شده است. در این مدل زاویه آتش TCR بطور مستقیم بصورت یک متغیر حالت در معادلات وارد می شود. سوسپتانس توالی مثبت SVC که در قسمت قبل استخراج شد در معادلات استفاده شده است. توان تزریقی SVC از رابطه زیر به دست می-آید:

$$Q_k = \frac{-V_k^2}{X_C X_L} \left\{ X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin(2\alpha_{SVC})] \right\} \quad (35-3)$$

از معادله (35-3) معادله خطی شده SVC بصورت زیر است :

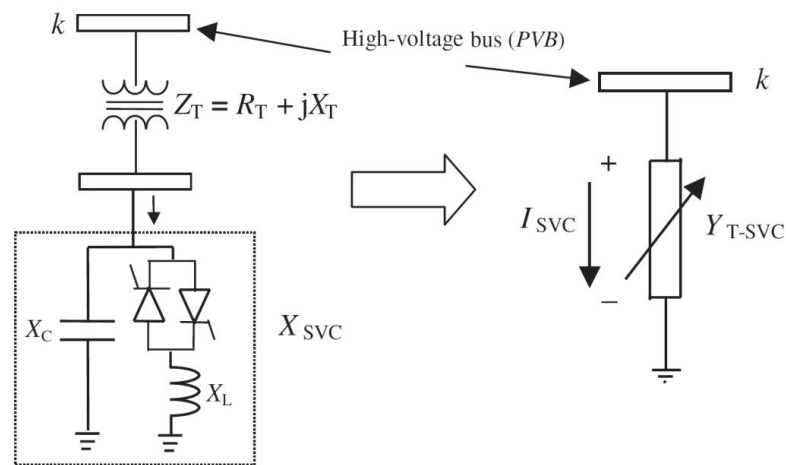
$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{2V_k^2}{\pi X_L} [\cos(2\alpha_{SVC}) - 1] \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \alpha_{SVC} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (36-3)$$

در انتهای تکرار i ام زاویه آتش α_{SVC} بصورت زیر اصلاح می شود :

$$\alpha_{SVC}^{(i)} = \alpha_{SVC}^{(i-1)} + \Delta \alpha_{SVC}^{(i)} \quad (37-3)$$

3-9-5- مدل ترکیبی ترانسفورماتور- زاویه آتش

در این مدل برای وارد کردن اثر ترانسفورماتور کاهنده ، مدل زاویه آتش SVC گسترش داده شده است. هر دو قسمت تشکیل دهنده مدل در اینجا با یکدیگر ترکیب شده به صورت یک مدل تکی نمایش داده شده اند. این امر اجازه می دهد که کنترل اندازه ولتاژ طرف فشار قوی ترانسفورماتور بدون اثر گذاشتن بر روی مشخصه همگرایی روش نیوتن- رافسون انجام شود [25].



شکل (3-6). مدل ترکیبی SVC با ترانسفورماتور [25]

ادمیتانس مجموع SVC و ترانسفورماتور ، Y_{T-SVC} دیده شده است فشار قوی ترانسفورماتور از ترکیب

ادمیتانس های Y_T و Y_{SVC} مطابق شکل (۳-۶) بدست می آید.

باید توجه داشت که ادمیتانس معادل Y_{T-SVC} تابعی از زاویه آتش SVC می باشد :

$$Y_{T-SVC}(\alpha_{SVC}) = \frac{Y_T Y_{SVC}}{Y_T + Y_{SVC}} \quad (۳۸-۳)$$

ادمیتانس جبرانساز شنت ترکیبی بصورت زیر است :

$$Y_{T-SVC} = G_{T-SVC} + jB_{T-SVC} \quad (۳۹-۳)$$

که در آن

$$B_{T-SVC} = -\frac{X_{Eq}}{R_T^2 + X_{Eq}^2}$$

$$X_{Eq} = X_T + X_{SVC} \quad , \quad X_{SVC} = \frac{X_C X_{TCR}}{X_C - X_{TCR}} \quad \text{و} \quad X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin(2\alpha_{SVC})}$$

معادلات خطی شده پخش بار بدین ترتیب حاصل می شوند :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & V_k^2 \frac{\partial G_{T-SVC}}{\partial \alpha_{SVC}} \\ 0 & -V_k^2 \frac{\partial B_{T-SVC}}{\partial \alpha_{SVC}} \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \alpha_{SVC} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (۴۰-۳)$$

عناصر ماتریس ژاکوبین از روابط زیر بدست می آیند :

$$\frac{\partial G_{T-SVC}}{\partial \alpha_{SVC}} = -\frac{R_T}{D^2} \frac{\partial D}{\partial \alpha_{SVC}}$$

$$\frac{\partial B_{T-SVC}}{\partial \alpha_{SVC}} = \frac{1}{D_T^2} \left(-D \frac{\partial X_{SVC}}{\partial \alpha_{SVC}} + X_{Eq} \frac{\partial D}{\partial \alpha_{SVC}} \right) \quad (۴۱-۳)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \alpha_{SVC}} = 2X_{Eq} \frac{\partial X_{SVC}}{\partial \alpha_{SVC}}$$

$$\frac{\partial X_{SVC}}{\partial \alpha_{SVC}} = \frac{2X_{SVC}^2}{\pi X_L} (1 - \cos(2\alpha_{SVC}))$$

$$D = R_T^2 + X_{Eq}^2$$

در انتها تکرار i ام زاویه آتش α_{SVC} از رابطه زیر اصلاح می شود :

$$\alpha_{SVC}^{(i)} = \alpha_{SVC}^{(i-1)} + \Delta \alpha_{SVC}^{(i)} \quad (3-42)$$

۳-۱۰- نحوه انجام کنترل ولتاژ SVC در مدلسازی های پخش بار

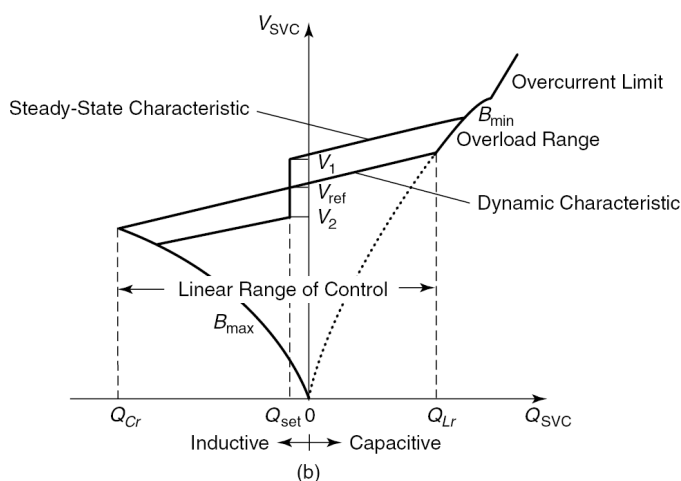
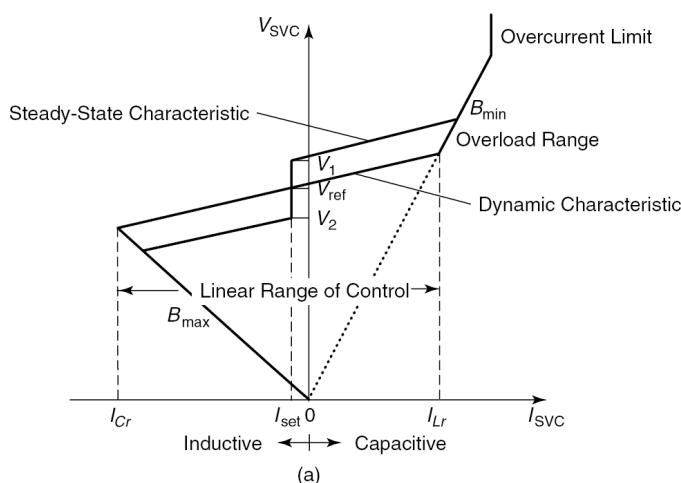
باس متصل به SVC یک باس ولتاژ کنترل شده است که اندازه ولتاژ و توانهای اکتیو و راکتیو آن مشخص می باشند و زاویه آتش α_{SVC} و یا سوسپتانس معادل B_{SVC} به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته می شوند. این باس از انواع PV می باشد. اگر α_{SVC} و B_{SVC} در محدوده طراحی شده قرار داشته باشد عمل کنترل ولتاژ خوبی انجام شده و باس بعنوان باس PV باقی می ماند. در صورت تجاوز α_{SVC} و B_{SVC} از محدوده طراحی شده، این متغیرها در نقطه حدی ثابت نگه داشته شده و باس تبدیل به باس PQ می شود. برای بازبینی و بررسی خروج SVC از محدوده طراحی مقدار اختلاف توان راکتیو مورد استفاده قرار می گیرد. در صورتیکه این مقدار کمتر از یک حد مشخص باشد (بطور معمول 0.003 پریونیت) باس بعنوان باس PQ در نظر گرفته می شود.

۳-۱۱- مشخصه های عملکرد SVC

مشخصه های حالت ماندگار و دینامیکی SVC تغییرات ولتاژ باس SVC را نسبت به جریان و یا توان راکتیو SVC توضیح می دهند [۲۸]. دو بیان متفاوت از این موضوع در شکل (۳-۷) نشان داده شده است. قسمت (a) مشخصه ولتاژ - جریان SVC و قسمت (b) مشخصه ولتاژ - توان راکتیو SVC را نشان می دهد. در این قسمت به بررسی بیشتر دو مشخصه استاتیکی و دینامیکی می پردازیم.

۳-۱۱-۱- مشخصه دینامیکی

ولتاژ مرجع V_{ref} ولتاژ ترمینال SVC در شرایط شناوری می باشد. در این حالت SVC هیچ توان راکتیوی جذب و یا تولید نمی کند ولتاژ مرجع می تواند با سیستم کنترل SVC بین یک مقدار ماکزیمم $V_{ref-max}$ و یک مقدار مینیمم $V_{ref-min}$ تغییر نماید. این کنترل توسط زاویه آتش تریستورها و یا تپ ترانسفورماتور کوپلینگ انجام می شود. مقادیر انتخابی متداول $V_{ref-max}$ و $V_{ref-min}$ به ترتیب 1.05 و 0.95 می باشند.



شکل (۳-۷). مشخصه های ولتاژ- جریان و توان راکتیو SVC [۲۳]

۳-۱۱-۱-۱- محدودده خطی کنترل SVC

رنج کنترلی است که ولتاژ ترمینال SVC بطور خطی با تغییر جریان و یا توان راکتیو می تواند تغییر کند. شیب^۱ در مشخصه دینامیکی SVC به عنوان نسبت تغییر اندازه ولتاژ نسبت به تغییر اندازه جریان SVC در رنج خطی جبرانسازی تعریف می شود.

$$K_{SL} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \Omega \quad (۴۳-۳)$$

که ΔV : تغییر در اندازه ولتاژ (V)

ΔI : تغییر در اندازه جریان (I)

مقدار پربونیت شیب به صورت زیر تعریف می شود.

$$K_{SL} = \frac{\Delta V / V_r}{\Delta I / I_r} pu \quad (۴۴-۳)$$

که I_r و V_r مقادیر نامی ولتاژ و جریان SVC می باشند.

شیب را می توان با استفاده از سیستم کنترلی تریستورهای جبرانسازی کنترل کرد. مقادیر معمول آن در محدوده ۵٪ - ۳ می باشند.

۳-۱۱-۲- مشخصه حالت ماندگار

مشخصه حالت ماندگار ولتاژ جریان SVC بسیار شبیه مشخصه دینامیکی آن می باشد. در صورت نبودن این حاشیه اطمینان ولتاژ حالت ماندگار SVC برای تنظیم ولتاژ به حدود توان راکتیو متمایل می شود. از لحاظ عملی به دلیل اهمیت کنترل ولتاژ و حفظ پایداری در مواقع وقوع اغتشاش SVC را با یک حاشیه توان راکتیو بسیار کم نمی توان بکار برد.

^۱ Droop

برای جلوگیری از این مشکل یک حاشیه مرزی حول V_{ref} جریان I_{SVC} را در نزدیکی صفر نگه می دارد. در این صورت توان راکتیو در نقطه تنظیم شده ثابت می ماند. برای ایجاد این حاشیه از یک تنظیم کننده سوسپتانس با ثابت زمانی چندین دقیقه استفاده می شود. در مواقعی که گذراهای بسیار سریع اتفاق می افتد این تنظیم کننده به دلیل داشتن ثابت زمانی بالا عملاً در کنترل کننده ولتاژ خللی ایجاد نمی کند.

۳-۱۲- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه مکان یابی SVC

در بخش های (۳-۴) و (۳-۵) فصل گذشته شاخص های مختلفی جهت ارزیابی پایداری ولتاژ سیستم قدرت معرفی گردید. مهمترین هدف عملیاتی نصب SVC در یک سیستم قدرت بهبود سطح پایداری ولتاژ می باشد. لذا تاکنون عمده ترین روش های مکان یابی SVC در سیستم قدرت ارائه شده بر مبنای بهینه کردن این شاخص های پایداری ولتاژ بوده است که در این قسمت به تعدادی از کارهای انجام شده در این زمینه می پردازیم.

در [۲۹] با استفاده از الگوریتم ژنتیک روشی جهت مکان یابی SVC در سیستم قدرت پیشنهاد شده است. تابع هدف در نظر گرفته شده در این روش، میزان قابلیت بارگذاری^۱ سیستم می باشد و نویسندگان به کار بردن انواع دیگر ادوات FACTS را به همراه SVC بهترین راه حل برای بیشینه کردن^۲ قابلیت بارگذاری سیستم معرفی کرده اند.

در [۳۰] روشی موسوم به LFI^۳ برای مکان یابی SVC مورد استفاده قرار گرفته است که به جای یافتن مستقیم باس های بحرانی، مبتنی بر یافتن خطوط انتقال بحرانی سیستم و سپس تعیین باس های بحرانی درگیر با مسأله ناپایداری ولتاژ می باشد.

^۱ System Loadability

^۲ Maximizing

^۳ Line Flow Index

روش ارائه شده در [۳۱] تحت عنوان روش فازور ولتاژ همانند روش LFI مبتنی بر یافتن خطوط انتقال بحرانی می‌باشد. علاوه بر این در این روش می‌توان مشخص کرد که مشکل ناپایداری ولتاژ بواسطه بارگذاری توان اکتیو و یا توان راکتیو در یک محل مشخص بوده‌است.

در [۳۲] و [۳۳] با استفاده از الگوریتم ژنتیک و به ترتیب با اهداف کاهش هزینه سرمایه‌گذاری نصب SVC و ایجاد پروفیل ولتاژ مسطح روش‌هایی جهت مکان‌یابی SVC ارائه شده‌است.

در [۳۴] مکان‌یابی SVC با هدف میرا کردن نوسانات بین ناحیه‌ای^۱ و همزمان بهبود پایداری ولتاژ با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است.

همچنین در [۳۵] محققان با استفاده از الگوریتم MOPSO^۲ که یک الگوریتم بهینه‌سازی پیشرفته می‌باشد، روشی را با هدف بهبود پایداری ولتاژ، کمینه^۳ کردن تلفات توان و نوسانات ولتاژ ارائه کرده‌اند.

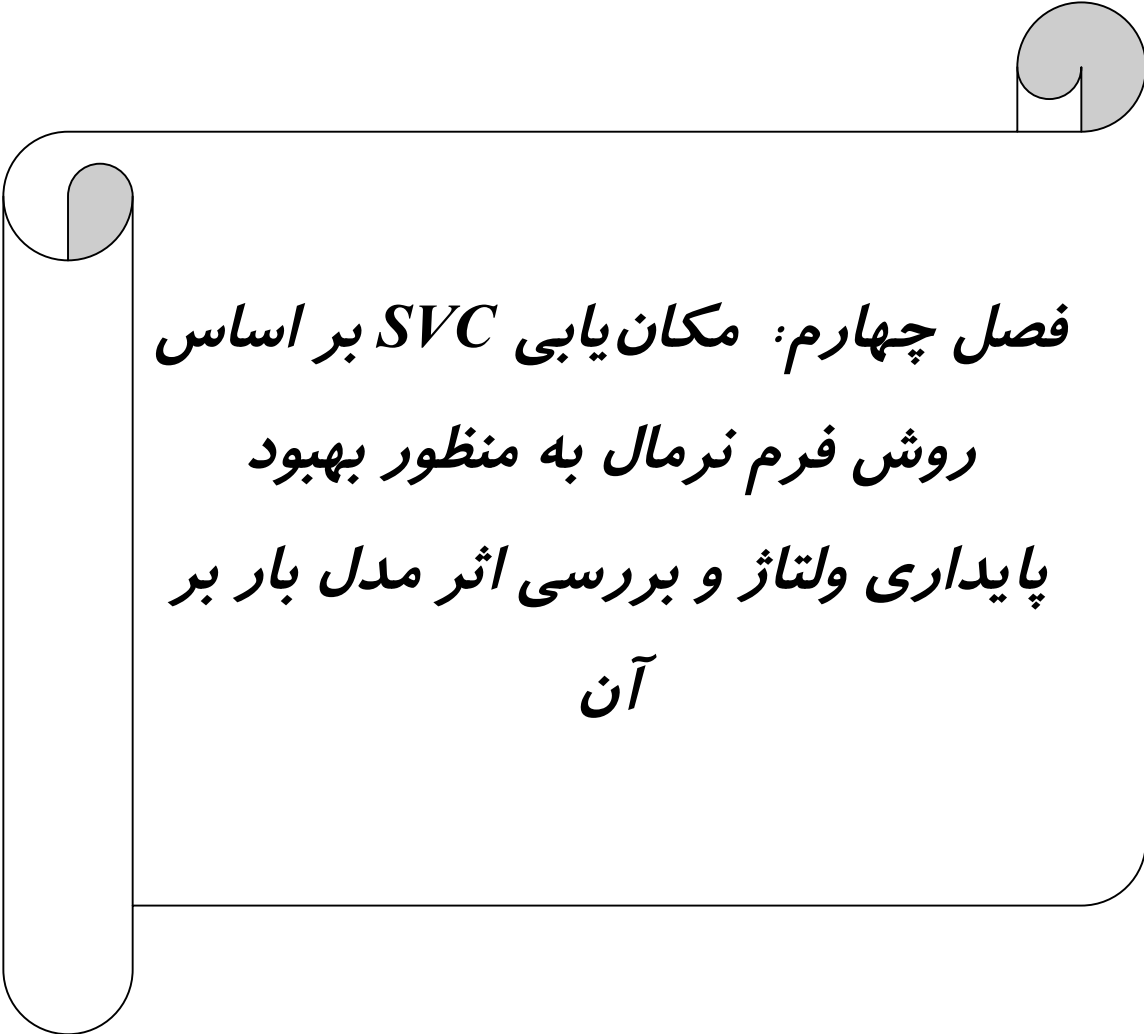
۳-۱۳- جمع‌بندی

در این فصل شاخص‌های ارزیابی پایداری ولتاژ معرفی گردید و موارد کاربرد هر کدام از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. این شاخص‌ها در روش ارائه شده برای حل مسأله مکان‌یابی SVC مورد استفاده قرار خواهد گرفت. همچنین در فصل آینده برای استخراج روابط مورد نیاز برای حل مسأله مکان‌یابی، مدل‌های استاتیکی SVC و بار مناسب از بین مدل‌های معرفی شده در این فصل انتخاب خواهند شد.

^۱ Inter-Area Oscillations

^۲ Multi Objective Particle Swarm Optimization

^۳ Minimizing

A decorative scroll graphic with a white background and a black border. The scroll is unrolled on the left and right sides, with the top and bottom edges curved. The text is centered within the scroll.

**فصل چهارم: مکان‌یابی SVC بر اساس
روش فرم نرمال به منظور بهبود
پایداری ولتاژ و بررسی اثر مدل بار بر
آن**

۴-۱- مقدمه

همانگونه که در فصول گذشته اشاره شد با جایگذاری مناسب SVC در سیستم قدرت و تزریق توان راکتیو به شبکه می‌توان عمل تنظیم ولتاژ را در باس نصب شده انجام داد. در بحث روش‌های استاتیکی ارزیابی پایداری ولتاژ اشاره شد که باس‌های مختلف نسبت به پایداری ولتاژ حساسیت‌های متفاوتی دارند و از این رو جایگذاری SVC در هر باس از لحاظ کمی و کیفی بطور متفاوتی بر پایداری ولتاژ اثر می‌گذارد.

راه حل ابتدایی مسئله مکان‌یابی SVC از دیدگاه استاتیکی و پخش بار سیستم در ابتدا بر مبنای بدست آوردن منحنی‌های P-V و P-Q در باس‌های مختلف سیستم و تعیین حاشیه پایداری بر مبنای شاخص‌هایی است که در فصل قبل به آن پرداخته شد. روش آنالیز مدال که برگرفته از تحلیل پایداری سیگنال کوچک می‌باشد و در بخش‌های گذشته توضیح داده شد یکی دیگر از روش‌های استاتیکی حل مسئله است. این روش بطور متداول بر مبنای خطی‌سازی معادلات پخش بار سیستم می‌باشد که در آن سیستم غیر خطی اولیه با تقریب خطی درجه اول در نظر گرفته می‌شود.

در حالیکه سیستم قدرت اثرات خطی قابل توجهی نداشته باشد این روش می‌تواند به جواب‌های صحیح و قابل قبول بیانجامد. در آنالیز مدال بطور متداول شاخص مقدار ویژه برای تعیین میزان نزدیکی سیستم به حد ناپایداری ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش همانگونه که در قبل اشاره شد با کم شدن قدرمطلق مقدار ویژه سیستم به ناپایداری نزدیک می‌شود [۳۶].

با این حال به دلیل اینکه در یک سیستم قدرت هزینه توسط عوامل مختلفی همچون اقتصاد، محیط و جامعه محدود شده است تمایل روزافزون به سمت بهره‌برداری هرچه بیشتر از سیستم ساخته شده می‌باشد و این امر ایجاب می‌کند که سیستم قدرت در نزدیکی حدود بحرانی کار کند و تحت

استرس و فشار بیشتر باشد. هر چقدر که شبکه پیچیده تر شده و بارهای آن بیشتر می شود اثرات غیر خطی نمود بیشتری یافته و بر عملکرد کل سیستم تأثیر بیشتری می گذارند [۳۶].

بنابراین تحلیل سیستم قدرت تحت استرس با استفاده از روش های خطی سازی متداول ممکن است به اشتباهات و نتایج غیر دقیق بیانجامد. به این دلیل در آنالیز مدال پایداری استاتیکی سیستم قدرت تحت استرس بایستی این مسئله مورد توجه قرار گیرد.

روش فرم نرمال یکی از روش های پیشرو بمنظور تحلیل سیستم های غیر خطی می باشد. این روش به دو صورت نرمال فرم فضای برداری و نرمال فرم غیر همریخت در فصل سوم معرفی شد. روش نرمال فرم فضای برداری تا کنون در مقالات مختلفی برای ارزیابی دینامیک غیر خطی سیستم قدرت به کار گرفته شده است [۳۷-۳۹].

روش نرمال فرم غیر همریخت در این پروژه جهت حل مسئله غیرخطی بودن مقالات آنالیز مدال مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص پایداری ولتاژ استفاده شده در روش مکان‌یابی در این پایان نامه اندازه مد بحرانی ناپایداری ولتاژ می باشد.

۴-۲- معادلات پخش بار و طرح مسئله

در روش آنالیز مدال، سیستم قدرت با استفاده از معادلات پخش بار بطور استاتیکی مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد. معادلات پخش بار سیستم را می توان بصورت زیر نوشت.

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (1-4)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, m$$

که در آن V_i ولتاژ باس i ، θ_{ij} اختلاف زاویه بین باس های i و j ، G_{ij} و B_{ij} به ترتیب کندانکتانس و سوسپتانس خط ارتباطی بین باس i و باس j می باشند. P_i و Q_i به ترتیب توان های اکتیو

و راکتیو تزریقی در باس i و m و n به ترتیب تعداد باس های P-Q و تعداد باس های کل شبکه می باشند. با فرض صرف نظر کردن از جملات درجه سوم به بالا و با توجه به توضیحات بخش (۲-۳-۱)، معادلات پخش بار با معادل سازی از رابطه (۲-۲۴) به صورت زیر نوشته می شوند:

$$L = f(x) = AX + X_2(x) \quad (۲-۴)$$

$$L_i = A_i x + \frac{1}{2} x^T H^i x \quad (۳-۴)$$

$$L = (P_1, P_2, \dots, P_{n-1}, Q_1, Q_2, \dots, Q_m)^T$$

$$x = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}, V_1, V_2, \dots, V_m)^T$$

ماتریس هسین H^i ضرایب تابع درجه دوم $X_2(x)$ در (۲-۲۴) می باشد و از رابطه زیر محاسبه می گردد

$$H_{jk}^i = \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_k} \quad (۴-۴)$$

۳-۴- جبرانسازی استاتیکی توان راکتیو (SVC)

نحوه مدل سازی جبرانساز استاتیکی توان راکتیو (SVC) و نحوه کنترل ولتاژ باس توسط آن در فصل سوم مورد بررسی قرار گرفت. هنگامیکه SVC در شبکه مورد استفاده قرار گیرد دو مسئله را بایستی مد نظر قرار داد:

۱- مکان نصب SVC

۲- ظرفیت SVC در تزریق توان راکتیو

این پروژه بر روی پاسخ سوال اول متمرکز می شود، همانگونه که در قبل به تفصیل پرداخته شد SVC و دیگر ادوات جبرانساز موازی در جایی که کنترل توان راکتیو یا ولتاژ مد نظر است مورد استفاده قرار می

گیرند. نقطه نصب SVC را هدف عملیاتی در نظر گرفته شده تعیین می‌کند. در این پروژه هدف بهبود پایداری ولتاژ می‌باشد که روش‌های تحلیل مختلف آن در فصل سوم توضیح داده شده است. در مکان‌یابی SVC انجام شده فرض بر این است که ظرفیت SVC به گونه ایست که با قرار گرفتن در شبکه نیازمندی‌های مورد نظر را برآورده ساخته و از رنج خطی خارج نمی‌شود. از روی مدل توضیح داده شده در بخش (۳-۹) ملاحظه گردید که SVC از گروهی از خازن‌های موازی و یک بانک سلفی با کنترل سریع تشکیل شده است. در قسمت کنترل ولتاژ ملاحظه گردید که یک SVC ایده آل می‌تواند اندازه ولتاژ باس متصل شده را با تزریق توان راکتیو مورد نیاز به شبکه ثابت نگه دارد. با این حال در کاربردهای عملی، سوسپیتانس معادل با یک شیب^۱ متغیر است تا عمل کنترل ولتاژ به صورت بهتری انجام گیرد [۲۹].

۴-۴- پیاده سازی فرم نرمال غیر همریخت در مسأله مکان‌یابی SVC برای بهبود پایداری ولتاژ

تئوری فرم نرمال در فضای برداری و فرم نرمال غیر همریخت به تفصیل در فصل دوم مورد بررسی قرار گرفت. در این پروژه برای تحلیل پایداری استاتیکی از تئوری فرم نرمال غیر همریخت استفاده شده است. برای یادآوری و پیاده سازی روش فرم نرمال در سیستم قدرت پاره ای از معادلات را بازنویسی می‌کنیم.

با توجه به رابطه (۲-۲۳) فرم جردن سیستم اولیه در بصورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$U_i^{-1}L = \lambda_i y_i + y^T C^i y = \lambda_i y_i + \sum_{j=1}^{n+m-1} \sum_{k=1}^{n+m-1} C_{jk}^i y_j y_k \quad (۵-۴)$$

که $U_i^{-1}L$ توان‌های حقیقی و موهومی مدال و λ_i ، i امین مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم (J) و y بردار متغیرهای حالت فرم جردن می‌باشد.

^۱ Droop

ضرایب C^i از رابطه روبه‌رو محاسبه می‌شوند:

$$C^i = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{n+m-1} v_{ip} U^T H^p U = [C_{jk}^i] \quad (6-4)$$

V ماتریس بردارهای ویژه چپ می‌باشد.

در فصل دوم اثبات شد که به ازای محاسبه ضرایب h^i از روابط (4-7) و (4-8) جملات درجه دوم حذف شده و معادله پخش بار به فرم تقریب خطی (4-7) نوشته می‌شوند.

$$h^i(z) = \sum_{k=1}^{n+m-1} \sum_{l=1}^{n+m-1} h_{kl}^i z_l z_k \quad (7-4)$$

$$h_{kl}^i = C_{kl}^i / (\lambda_k \lambda_l - \lambda_i). \quad (8-4)$$

$$U_i^{-1} L = \lambda_i z_i \quad (9-4)$$

4-4-1- نحوه تأثیر محاسبه ضرایب مشارکت

مفهوم ضرایب مشارکت باس و مدهای پایداری ولتاژ که در فصول دوم و سوم معرفی شد، در اینجا برای انجام تحلیل فرم نرمال برای حل مسأله مکان‌یابی SVC برای بهبود پایداری ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدترین مد از لحاظ پایداری در اینجا مد بحرانی معرفی می‌گردد. ضریب مشارکت ولتاژ یک باس در مد بحرانی به نوعی بیانگر درجه مشارکت ولتاژ باس در پایداری کل سیستم می‌باشد. همان‌گونه که اشاره شد، هرچه ضریب مشارکت ولتاژ باس بیشتر باشد، مقدار تاثیر آن باس در پایداری ولتاژ سیستم بیشتر است. در نتیجه این باس می‌تواند محلی مناسب برای نصب SVC به منظور بهبود پایداری ولتاژ شبکه باشد [40].

ضرایب مشارکت خطی برای اولین بار در تحلیل سیگنال کوچک¹ مورد استفاده قرار گرفته است و سالیان زیادی بعنوان یک ابزار کمکی جهت مکانیابی ادوات کنترلی مورد استفاده قرار گرفته است [41].

¹ Small signal stability (SSA)

ضریب مشارکت خطی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$p_{ki} = u_{ki} v_{ik} \quad (10-4)$$

که P_k بیانگر مقدار مشارکت حالت k ام در مد i ام می‌باشد.

اثرات غیرخطی در یک سیستم تحت استرس زیاد نقش مهمی در رفتار آن سیستم ایفا می‌کند [۴۲]. در این شرایط، ضرایب مشارکتی که بر اساس تقریب خطی تعریف شده اند ممکن است مشخصات مهمی از سیستم را نادیده می‌گیرند. در بحث پایداری ولتاژ نیز استفاده از تقریب خطی در سیستم‌های تحت استرس زیاد میزان مشارکت باس‌ها در پایداری ولتاژ بطور صحیح اندازه‌گیری نمی‌کند. از این رو در روش مکان‌یابی ارائه‌شده، با استفاده از تئوری فرم نرمال و معرفی ضریب مشارکت غیر خطی در پی حل این نقیصه هستیم.

بر اساس بخش (۲-۵-۲) ضرایب مشارکت غیرخطی به صورت زیر تعریف شده است [۳۷]:

$$p_{2kj} = u_{kj} (v_{jk} + v_{jkk}) \quad (11-4)$$

$$p_{2krs} = u_{krs} (v_{rk} + v_{rkk}) (v_{sk} + v_{skk}) \quad (12-4)$$

$$v_{jkk} = - \sum_{p=1}^{n+m-1} \sum_{q=1}^{n+m-1} h_{pq}^j v_{pk} v_{qk} \quad \text{که}$$

$$v_{rks} = \sum_{j=1}^{n+m-1} u_{kj} h_{rs}^j$$

معادله (۱۱-۴) بیان می‌کند که ضرایب مشارکت خطی تنها قسمتی از p_{2kj} می‌باشند. p_{2kj} بیانگر میزان مشارکت حالت k ام در مد i ام می‌باشد. در (۱۲-۴) ضرایب مشارکت درجه دوم p_{2krs} بیانگر مشارکت حالت k ام در مد ترکیبی حاصل از مدهای r ام و s ام می‌باشد. از آنجاییکه ضرایب مشارکت درجه دوم غیر خطی P_{2krs} تاثیر بسیار کمتری نسبت به ضرایب مشارکت درجه اول غیر خطی دارند و

از طرفی محاسبه آنها، بار محاسباتی بسیار بیشتری به همراه دارد، در این پروژه از ضرایب مشارکت غیرخطی درجه اول در حل مسئله مکان‌یابی SVC استفاده شده است.

در محاسبه ضرایب مشارکت دو مسئله زیر مد نظر قرار گرفته است:

الف) بر اساس نتایج ارائه شده در [۴۲]، بردارهای ویژه ماتریس ژاکوبین کامل سیستم همیشه برابر با بردارهای ویژه ماتریس ژاکوبین کاهش یافته (در فصل سوم توضیح داده شده است) می‌باشند و همه اطلاعات موجود در ماتریس ژاکوبین در بردارهای ویژه ماتریس ژاکوبین کاهش یافته موجود می‌باشند. علاوه بر این هرچقدر شرایط کاری از منفرد دور باشد تفاوت بین بردارهای ویژه بیشتر است. بنابراین در این پایان‌نامه برای داشتن اطلاعات دقیقتر و بیشتر از ماتریس ژاکوبین کامل سیستم در تحلیل پایداری ولتاژ استفاده شده است.

ب) ضرایب مشارکت غیر خطی p_{2kj} به عنوان معیاری جهت پیدا کردن نقطه مناسب نصب SVC برای بهبود پایداری ولتاژ معرفی گردیده است. از روی رابطه (۴-۱۱) این شاخص دارای دو جمله $p_{kj} = u_{kj} v_{jk} + u_{kj} v_{jkk}$ می‌باشد. از آنجاییکه ماتریس ژاکوبین کامل سیستم را مورد استفاده قرار داده ایم، بعد ماتریس $(n+m-1)$ است. مقدار v_{jkk} با استفاده از ماتریس هسین و ماتریس V حاصل می‌شود. برای بدست آوردن نیازمند محاسبات بیشتری هستیم. در نهایت ضرایب مشارکت غیرخطی با اضافه کردن $u_{jk} v_{jkk}$ به ضرایب مشارکت خطی حاصل می‌شوند. بار محاسباتی تحلیل شده در این روش قابل توجه و به صرفه است.

۴-۵- محاسبه ماتریس هسین و ماتریس حالت

معادلات پخش بار سیستم در (۴-۱) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} P_i = |V_i| \left| \sum_{j=1}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \right. \\ Q_i = |V_i| \left| \sum_{j=1}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \right. \end{cases} \quad (13-4)$$

ماتریس حالت سیستم که در (۲-۴) نشان داده شده است، به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_1} & \dots & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_m} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_1} & \dots & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} \end{bmatrix} \quad (14-4)$$

عناصر این ماتریس با استفاده از فرمول‌های زیر بدست ما آیند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} &= -|V_i| \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \right. \\ \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} &= |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_i} &= 2|V_i| |Y_{ii}| \cos(\gamma_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_j} &= |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \end{aligned} \quad (15-4)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = -|V_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = 2|V_i| |Y_{ij}| \sin(\gamma_{ij}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = |V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

ماتریس هسین کلی سیستم یک ماتریس سه بعدی به اندازه $(n+m-1) \times (n+m-1) \times (n+m-1)$ است. به ازای هر متغیر P_i یک ماتریس هسین H^i با ابعاد $(n+m-1) \times (n+m-1)$ مطابق رابطه (۳-۴) تعریف می‌شود.

$$H^i = \begin{array}{c} \text{For Active Power} \\ \text{For Active Power} \end{array} \begin{array}{c} i \\ = \end{array} \left[\begin{array}{cccc|cccc} \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_1^2} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_1 \partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_1 \partial V_1} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_1 \partial V_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_1 \partial V_m} \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_2 \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_2^2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_2 \partial V_1} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_2 \partial V_2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_{n-1} \partial \theta_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_{n-1} \partial V_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_{n-1} \partial V_m} \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_2 \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_1 \partial \theta_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_1 \partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_1^2} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_1 \partial V_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_{n-1} \partial V_m} \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_2 \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_2 \partial \theta_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_1 \partial V_2} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_2^2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_m \partial \theta_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_m \partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_m \partial V_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_m^2} \end{array} \right]$$

(۱۶-۴)

عناصر ماتریس هسین برای متغیرهای Q_i از روابط زیر قابل محاسبه هستند.

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i^2} = -|V_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i \partial \theta_k} = 0$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_j^2} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i \partial V_j} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i \partial V_i} = -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \quad (17-4)$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial V_i \partial \theta_j} = |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial V_i \partial \theta_k} = 0$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial V_i^2} = 2|Y_{ij}| \cos(\gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial V_i \partial V_j} = |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 P_i}{\partial V_j^2} = 0$$

ماتریس هسین برای متغیر Q_i بصورت زیر می باشد:

$$H^i = \begin{matrix} \text{For Reactive Power} \\ \text{For Reactive Power} \end{matrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_1^2} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_1 \partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_1 \partial V_1} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_1 \partial V_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_1 \partial V_m} \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_2 \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_2^2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_2 \partial V_1} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_2 \partial V_2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_{n-1} \partial \theta_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_{n-1} \partial V_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_{n-1} \partial V_m} \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_2 \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_1 \partial \theta_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_1 \partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_1^2} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_1 \partial V_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_{n-1} \partial V_m} \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_2 \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_2 \partial \theta_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_1 \partial V_2} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_2^2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_m \partial \theta_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_m \partial \theta_{n-1}} & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_m \partial V_1} & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_m^2} \end{bmatrix}$$

(۱۸-۴)

عناصر ماتریس هسین برای متغیرهای Q_i از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i^2} = -|V_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

(۱۹-۴)

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i \partial \theta_k} = 0$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_j^2} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i \partial V_j} = -|V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i \partial V_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_i \partial \theta_j} = -|V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_i \partial \theta_k} = 0$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_i^2} = 2|Y_{ij}| \sin(\gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_i \partial V_j} = |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})$$

$$\frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_j^2} = 0$$

بعد از محاسبه ماتریس هسین، با استفاده از رابطه (۴-۶) ماتریس‌های C^i را می‌توان محاسبه نمود.

۴-۶- نحوه وارد کردن مدل SVC در معادلات

در فصل چهارم مدل‌های مختلف پخش بار SVC مورد بررسی قرار گرفت. مدل انتخاب شده در این پروژه مدل سوسپتانس موازی متغیر نشان داده شده در شکل (۴-۱) است. در این مدل سوسپتانس از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\left. \begin{aligned} B_{SVC} &= B_C - B_{TCR} = \frac{1}{X_C X_L} \left\{ X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)] \right\} \\ X_L &= \omega L \\ X_C &= \frac{1}{\omega C} \end{aligned} \right\} \quad (۴-۲۰)$$

در این صورت معادلات پخش بار به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

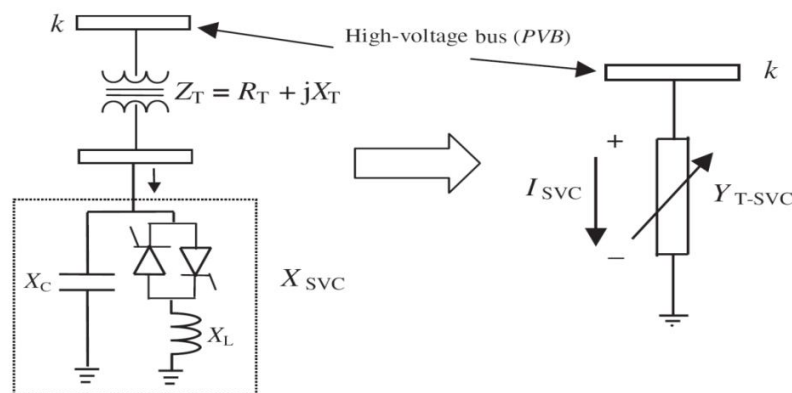
$$Q_{SVC} = Q_k = -V_k^2 B_{SVC} \quad (۴-۲۱)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_k \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta B_{SVC} / B_{SVC} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (22-4)$$

و

$$B_{SVC}^{(i)} = B_{SVC}^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC}} \right)^{(i)} B_{SVC}^{(i-1)} \quad (23-4)$$

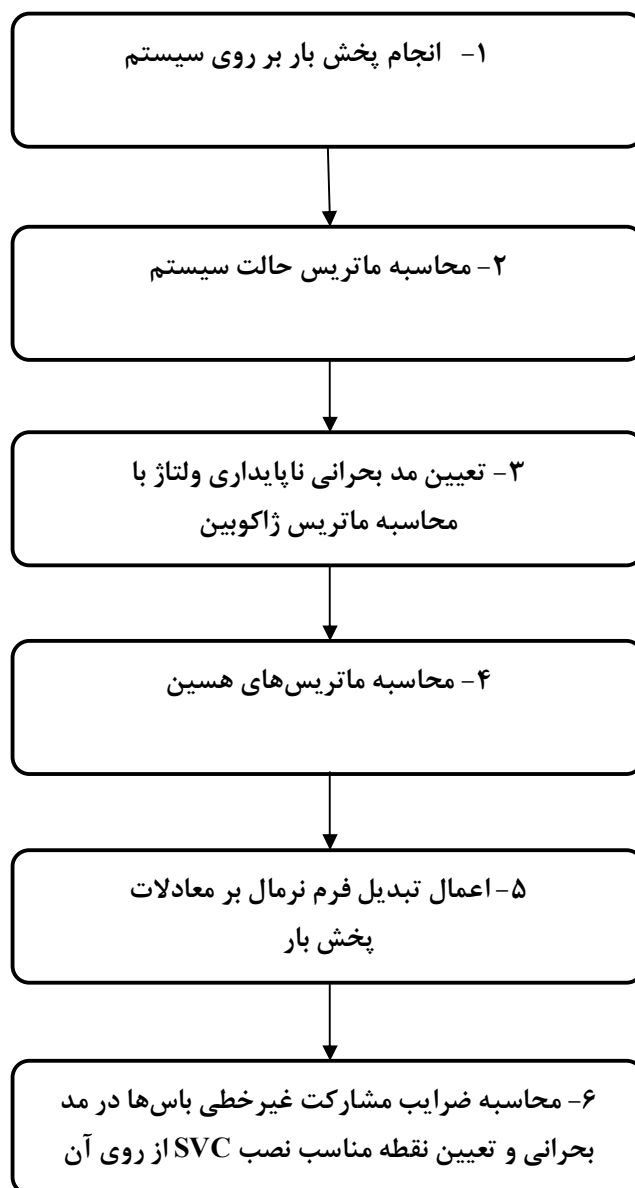
در صورت نصب SVC در یک باس، باس مورد نظر تبدیل به باس P-V می‌شود و مقدار سوسپتانس در معادلات یک متغیر حالت می‌باشد.



شکل (۴-۱). مدل سوسپتانس متغیر SVC [۲۵]

۴-۷- مراحل انجام مکان‌یابی SVC برای بهبود پایداری قدرت با استفاده از فرم نرمال

در این قسمت، مراحل پیاده‌سازی روش مکان‌یابی ارائه‌شده با استفاده از مباحث مطرح شده در (۴-۲) تا (۴-۶) به صورت خلاصه طبقه‌بندی شده و در شکل (۴-۲) نشان داده شده‌است.



شکل (۴-۲). مراحل انجام روش مکان‌یابی SVC با استفاده از روش فرم نرمال

۴-۸- تأثیر مدل سازی بار بر مکان‌یابی SVC با استفاده از تحلیل فرم نرمال

همانگونه که در فصل سوم اشاره شد مشخصه‌های بار نقش مهمی در پایداری ولتاژ شبکه دارند. در مطالعات پایداری استاتیک ولتاژ از مدل‌های استاتیکی بار استفاده می‌شود. در این نوع مدلسازی

مشخصه بار در هر لحظه از زمان تابع جبری از اندازه ولتاژ باس و فرکانس شبکه در آن لحظه بیان می‌شوند و مؤلفه‌های توان اکتیو و راکتیو بصورت جداگانه مدل می‌شوند. وابستگی مشخصه بار به ولتاژ معمولاً با مدل نمایی بیان می‌شود که نحوه نمایی بودن آن یکی از متغیرهای تأثیرگذار می‌باشد. از آنجاییکه بررسی دقیق هر یک از متغیرهای مدلسازی بار و استخراج نتایج قابل تحلیل از آن‌ها کار پیچیده‌ایست، در این پروژه برای بررسی تأثیر مدلسازی بار بر مکان‌یابی SVC از مدل ترکیبی ZIP استفاده شده است.

$$P = P_0[p_1\bar{V}^2 + p_2\bar{V} + p_3] \quad (24-4)$$

$$Q = Q_0[q_1\bar{V}^2 + q_2\bar{V} + q_3]$$

در این مدل ترکیبی با تغییر ضرایب P_1 و P_2 و P_3 و همچنین q_1 و q_2 و q_3 می‌توان میزان تأثیرگذاری هر کدام از مدل‌های توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت را تغییر داد.

از آنجاییکه در تحلیل پایداری استاتیک ولتاژ تغییرات فرکانس نقش بسیار کم‌رنگی ایفا می‌کنند، از مدلسازی بار بر مبنای متغیر فرکانس صرف‌نظر کرده و فرکانس شبکه ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۴-۸-۱- محاسبه ماتریس‌های حالت و ماتریس‌های هسین با در نظر گرفتن مدل بار ZIP

برای پیاده‌سازی اثر مدلسازی بار عناصر ماتریس‌های حالت رابطه (۲-۴) باید به صورت زیر محاسبه گردد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} &= -|V_i| \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \right| \\ \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} &= |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_i} &= 2|V_i| |Y_{ij}| \cos(\gamma_{ij}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) - 2p_{1i} - p_{2i} \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_j} &= |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \end{aligned} \quad (25-4)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} &= -|V_i| \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \right. \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} &= -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} &= 2|V_i| |Y_{ij}| \sin(\gamma_{ij}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) - 2q_{1i} V_i - q_{2i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} &= |V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij})\end{aligned}$$

در این معادلات، P_{i1}, P_{i2} به ترتیب سهم مؤلفه‌های جریان ثابت و امیدانس ثابت توان اکتیو مدل ZIP در

باس i می‌باشد. مقایسه روابط (۴-۱۳) و (۴-۲۵) نشان می‌دهد که مقدار جملات $\frac{\partial P_i}{\partial V_i}$ و $\frac{\partial Q_i}{\partial V_i}$ با در نظر

گرفتن مدل ZIP بار تغییر می‌کند.

عناصر ماتریس‌های هسین (۴-۱۶) و (۴-۱۸) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i^2} &= -|V_i| \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \right. & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i \partial V_j} &= -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i \partial \theta_j} &= |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) & \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i \partial V_i} &= -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_i \partial \theta_k} &= 0 & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_i^2} &= 2|Y_{ij}| \cos(\gamma_{ij}) - 2p_{i1} \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial \theta_j^2} &= -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_i \partial V_j} &= |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_i \partial \theta_j} &= |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) & \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_j^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial V_i \partial \theta_k} &= 0\end{aligned}$$

(۴-۲۶)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i^2} &= -|V_i| \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \right| & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_i^2} &= 2|Y_{ij}| \sin(\gamma_{ij}) \\
\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i \partial \theta_j} &= |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_i \partial V_j} &= |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \\
\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i \partial \theta_k} &= 0 & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_j^2} &= 0 \\
\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_j^2} &= -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_i \partial \theta_j} &= -|V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) \\
\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i \partial V_j} &= -|V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) & \frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_i \partial \theta_k} &= 0 \\
\frac{\partial^2 Q_i}{\partial \theta_i \partial V_i} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma_{ij}) & &
\end{aligned}$$

(۲۷-۴)

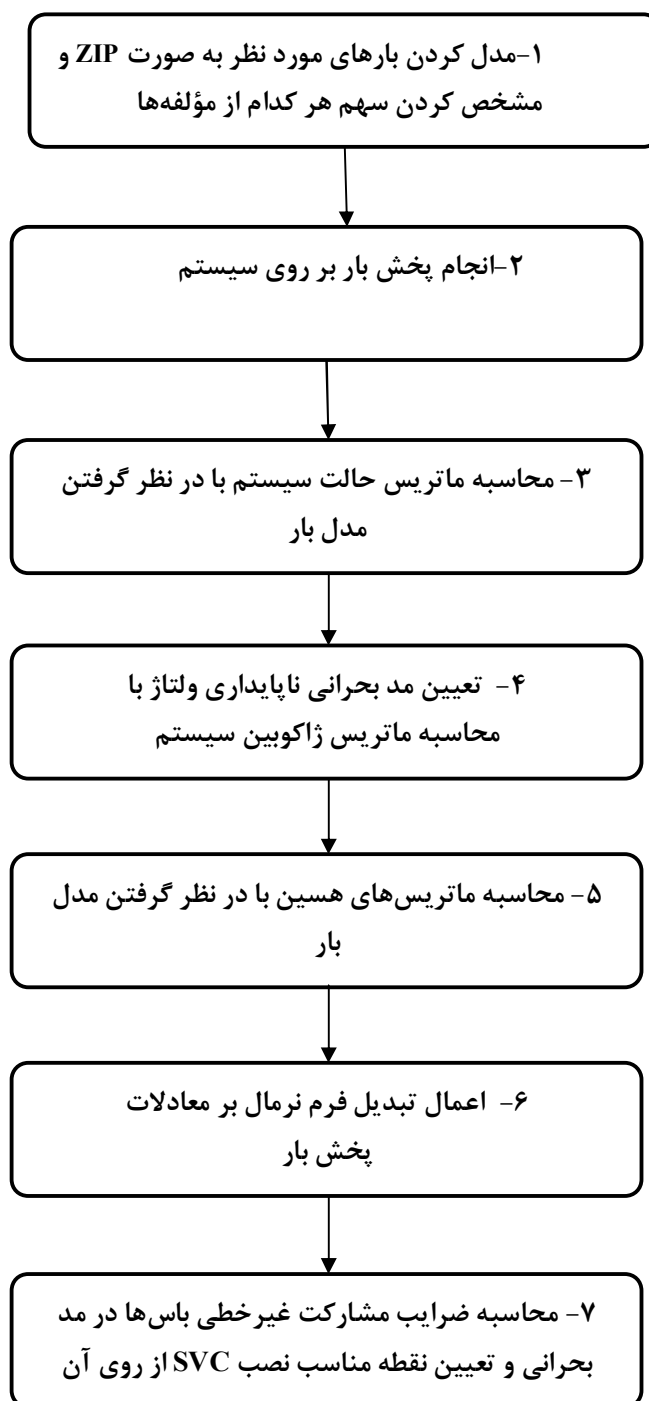
مقایسه روابط (۴-۱۳) و (۴-۱۷) با روابط (۴-۲۶) و (۴-۲۷) نشان‌دهنده تغییر در مقدار جملات $\frac{\partial^2 Q_i}{\partial V_i^2}$ و

در صورت در نظر گرفتن مدل بار ZIP می‌باشد.

۴-۹- مراحل انجام مکان‌یابی SVC برای بهبود پایداری قدرت با استفاده از فرم نرمال و با در نظر گرفتن مدل بار

در این قسمت، مراحل پیاده‌سازی روش مکان‌یابی ارائه‌شده با استفاده از مباحث مطرح شده در (۴-۲) تا

(۴-۶) و همچنین مباحث مدل بار در شکل (۴-۳) به صورت خلاصه طبقه‌بندی شده است.



شکل (۴-۳). مراحل انجام روش مکان‌یابی SVC با استفاده از روش فرم نرمال و با در نظر گرفتن مدل بار

۴-۹- جمع بندی

در این فصل روش مکان‌یابی پیشنهادی توضیح داده شد و معادلات لازم برای پیاده‌سازی این روش بر روی یک سیستم قدرت استخراج گردید. این معادلات در فصل آینده در شبیه‌سازی یک سیستم نمونه به کار خواهند رفت.

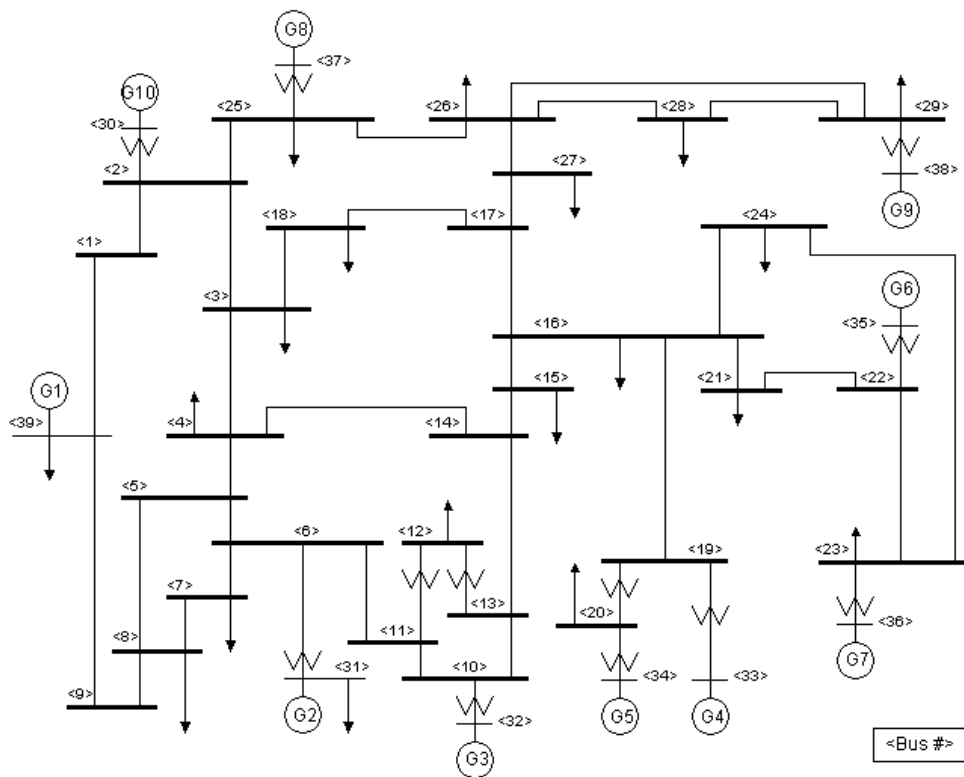
فصل پنجم: شبیه سازی

۵-۱- مقدمه

برای بررسی کارایی روش ارائه شده در این پروژه، روش مکان‌یابی بر روی یک سیستم استاندارد پیاده‌سازی شده است. میزان موفقیت ضرایب مشارکت غیر خطی به‌دست آمده از فرم نرمال در نشان دادن اثرات غیرخطی سیستم با تغییر در میزان بارگذاری سیستم و مقایسه با نتایج حاصل از به‌کار برتن ضرایب مشارکت خطی سنجیده خواهد شد. همچنین نحوه تأثیرگذاری نوع مدل بار نیز با شبیه‌سازی به ازای حالات مختلف بارگذاری و مدل‌های مختلف بار بررسی خواهد شد و نتایج مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

۵-۲- سیستم تحت آزمایش

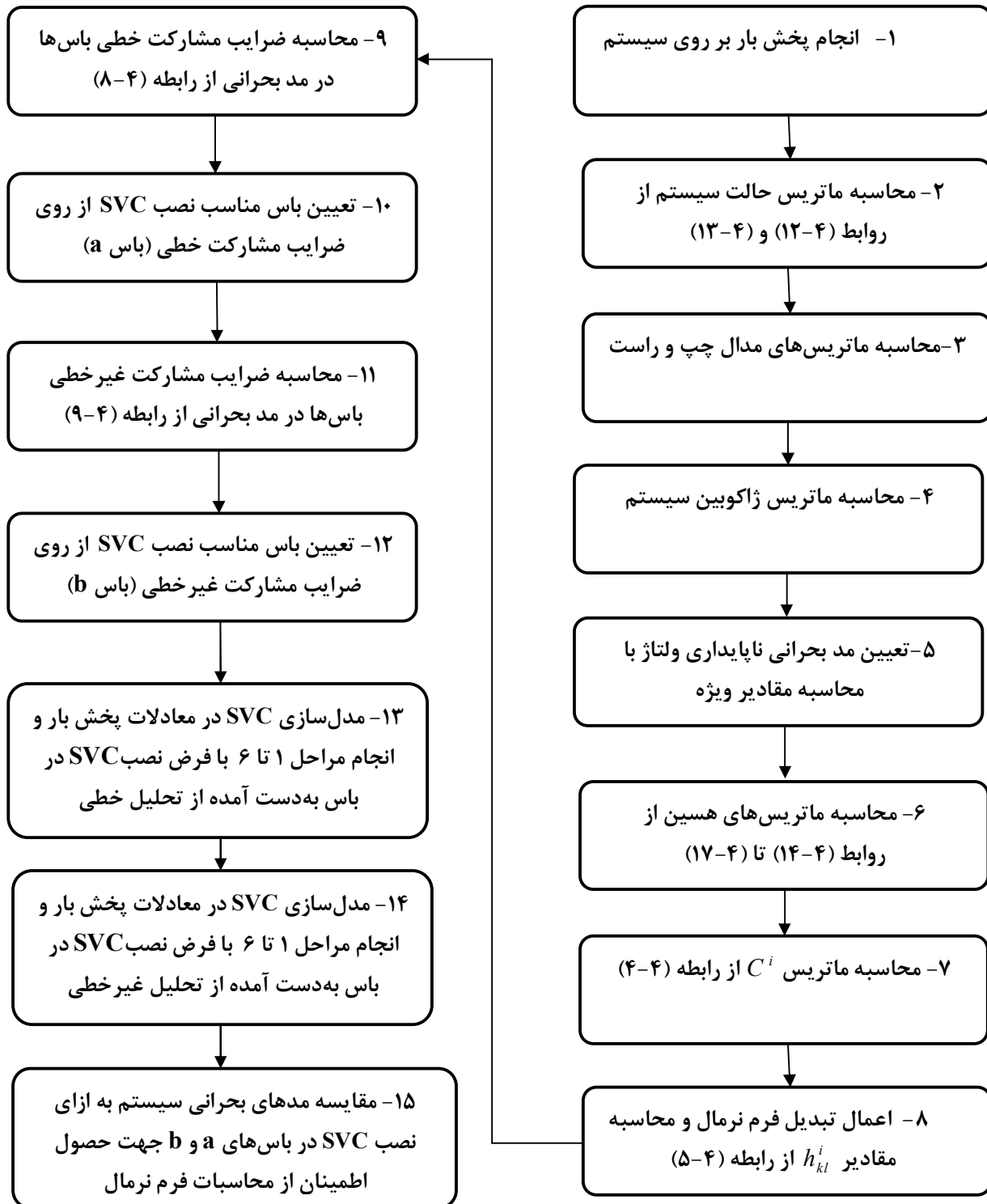
سیستم آزمایش بکار رفته سیستم ۳۹ باس استاندارد موسوم به New England می‌باشد. در این سیستم که در شکل (۵-۱) نمایش داده شده است، تمامی باس‌های ۳۰ تا ۳۹ باس ژنراتوری یا P-V می‌باشند. باس ۳۱ به عنوان باس مرجع انتخاب شده است. تمامی باس‌های دیگر باس P-Q می‌باشند و محل نصب SVC به منظور بهبود پایداری ولتاژ از میان این باس‌ها انتخاب می‌شود. داده‌های این سیستم در ضمیمه (الف) آورده شده است.



شکل (۵-۱). سیستم ۳۹ باس New England [۴۵]

۵-۳- مراحل شبیه‌سازی مسأله مکان‌یابی SVC

بر مبنای روش ارائه شده در فصل چهارم، مراحل شبیه‌سازی مسأله مکان‌یابی SVC بر روی سیستم تحت آزمایش در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. همچنانکه در قسمت بعدی بیان خواهد شد، مراحل این شبیه‌سازی به ازای بارگذاری‌های مختلف سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۲-۵). مراحل شبیه‌سازی مکان‌یابی SVC

۵-۴- مکان‌یابی به ازای شرایط بارگذاری مختلف

۵-۴-۱- حالت اول - سیستم استاندارد

نتایج پخش بار سیستم در حالت استاندارد در جدول (۵-۱) نشان داده شده است. مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم به ازای این پخش بار در جدول (۵-۲) نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود مقدار ویژه $0/۶۵۵۸$ از ماتریس ژاکوبین دارای کمترین اندازه می‌باشد. بنابراین مد متناظر با آن مد بحرانی پایداری ولتاژ شبکه محسوب می‌شود. حال با داشتن این مد بحرانی میزان مشارکت ولتاژ باس‌های مختلف در این مد را با استفاده از ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی می‌توان بدست آورد. با استفاده از رابطه (۴-۱۱) مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت باس‌های P-Q شبکه محاسبه گردیده و در جدول (۵-۳) نمایش داده شده است.

جدول (۵-۱). نتایج پخش بار حالت استاندارد

BUS NO.	Voltage(pu)	Angle(rad)	BUS NO.	Voltage(pu)	Angle(rad)
BUS 1	1.0474	-0.14745	BUS 21	1.0318	-0.066207
BUS 2	1.0487	-0.1006	BUS 22	1.0498	0.011441
BUS 3	1.0302	-0.15025	BUS 23	1.0448	0.0079804
BUS 4	1.0038	-0.16782	BUS 24	1.0373	-0.10613
BUS 5	1.0052	-0.15043	BUS 25	1.0576	-0.076341
BUS 6	1.0076	-0.13887	BUS 26	1.0521	-0.096657
BUS 7	0.99692	-0.17682	BUS 27	1.0377	-0.13102
BUS 8	0.99593	-0.1854	BUS 28	1.0501	-0.035364
BUS 9	1.0282	-0.1803	BUS 29	1.0499	0.012795
BUS 10	1.0171	-0.094855	BUS 30	1.0475	-0.05837
BUS 11	1.0126	-0.10981	BUS 31	0.982	0
BUS 12	1.0001	-0.10911	BUS 32	0.9831	0.044708
BUS 13	1.0143	-0.10657	BUS 33	0.9972	0.072988
BUS 14	1.0117	-0.13379	BUS 34	1.0123	0.05519
BUS 15	1.0154	-0.13523	BUS 35	1.0493	0.09804
BUS 16	1.0318	-0.10822	BUS 36	1.0635	0.14504
BUS 17	1.0335	-0.12764	BUS 37	1.0278	0.042072
BUS 18	1.0309	-0.14373	BUS 38	1.0265	0.13607
BUS 19	1.0499	-0.018074	BUS 39	1.03	-0.17561
BUS 20	0.99117	-0.035387			

جدول (۲-۵). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری استاندارد

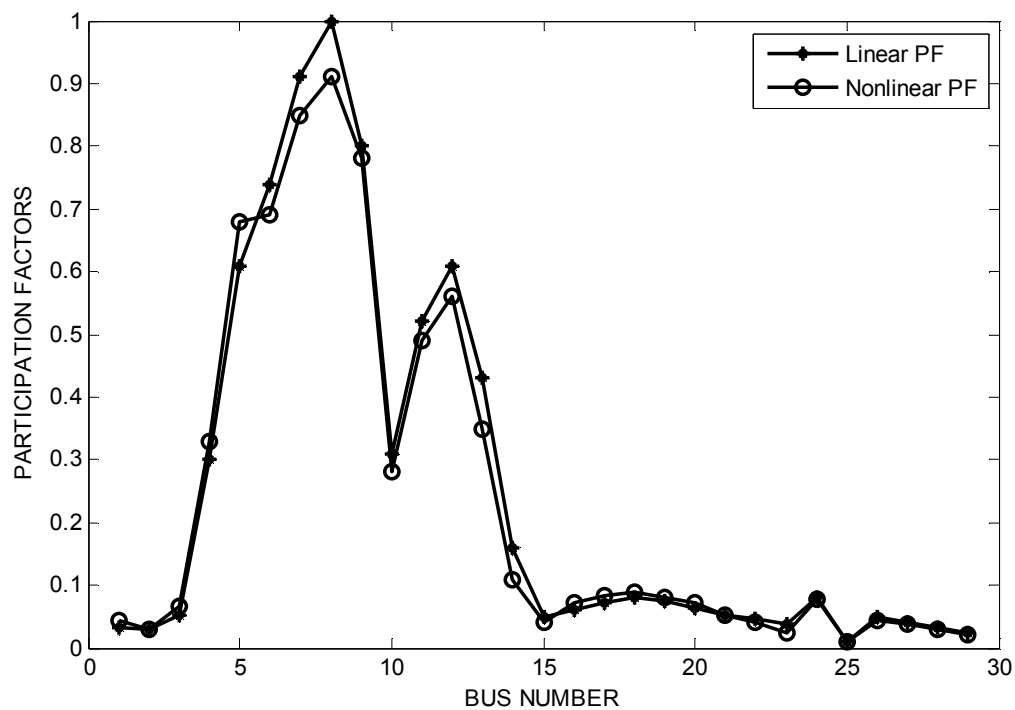
1032.9 + 77.413i	1032.9 - 77.413i	786.81 + 68.922i	786.81 - 68.922i
682.95 + 46.163i	682.95 - 46.163i	522.56 + 43.414i	522.56 - 43.414i
410.3 + 35.011i	410.3 - 35.011i	393.9 + 31.945i	393.9 - 31.945i
294.12 + 100.93i	294.12 - 100.93i	365.45 + 9.9702i	365.45 - 9.9702i
336.78 + 23.684i	336.78 - 23.684i	251.56	235.55 + 34.851i
235.55 - 34.851i	237.68	225.25 + 18.045i	225.25 - 18.045i
213.17 + 17.932i	213.17 - 17.932i	209.79 + 4.1452i	209.79 - 4.1452i
179.32 + 11.261i	179.32 - 11.261i	157.71 + 4.5529i	157.71 - 4.5529i
142.16 + 6.8638i	142.16 - 6.8638i	139.54	131.06
124.16	122.71	117.19	0.65587
5.9894	7.0666	9.7497	11.297
13.12	95.202	91.221	89.132 + 2.5388i
89.132 - 2.5388i	18.245	20.101	81.072 + 0.81483i
81.072 - 0.81483i	76.373	70.026	63.401 + 2.2127i
63.401 - 2.2127i	32.851	33.52	50.357
45.949	63.711	40.163 + 0.85198i	40.163 - 0.85198i
41.273	44.215	42.208	

از روی این نتایج ولتاژ باس ۸ با داشتن بیشترین ضریب مشارکت در مد بحرانی، مناسبترین نقطه نصب SVC به منظور بهبود پایداری ولتاژ سیستم می باشد. ضرایب مشارکت غیر خطی P_{2kj} با داشتن مقادیر H_{ki}^i که از روابط (۴-۱۷) تا (۴-۱۹) حاصل شده اند، بدست می آید. مقادیر نرمالیزه شده این ضرایب مشارکت نیز در جدول (۳-۵) نمایش داده شده است.

جدول (۳-۵). مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم

BUS NO.	LINEAR PF	NONLINEAR	BUS NO.	LINEAR PF	NONLINEAR
BUS 1	0.0332	0.044	BUS 16	0.06	0.073
BUS 2	0.029	0.031	BUS 17	0.073	0.083
BUS 3	0.053	0.066	BUS 18	0.081	0.092
BUS 4	0.31	0.33	BUS 19	0.075	0.08
BUS 5	0.61	0.68	BUS 20	0.063	0.072
BUS 6	0.74	0.69	BUS 21	0.052	0.052
BUS 7	0.91	0.85	BUS 22	0.048	0.041
BUS 8	1.00	0.91	BUS 23	0.037	0.023
BUS 9	0.8	0.78	BUS 24	0.08	0.079
BUS 10	0.31	0.28	BUS 25	0.011	0.009
BUS 11	0.52	0.49	BUS 26	0.05	0.045
BUS 12	0.61	0.56	BUS 27	0.041	0.038
BUS 13	0.43	0.35	BUS 28	0.032	0.029
BUS 14	0.16	0.11	BUS 29	0.025	0.021
BUS 15	0.05	0.041			

برای مقایسه بهتر نتایج بدست آمده از تحلیل خطی و غیر خطی (فرم نرمال) این مقادیر بر روی یک نمودار مشترک مطابق شکل (۲-۵) ترسیم شده‌اند. از روی این نمودار و با استفاده از تحلیل فرم نرمال باس ۸ به عنوان نقطه مناسب نصب SVC معرفی می‌شود که همان نتیجه بدست آمده از تحلیل خطی است. سایر مقادیر ضریب مشارکت در تحلیل فرم نرمال مشابه تحلیل خطی می‌باشد و تفاوت معناداری مشاهده نمی‌شود. از آنجاییکه بارگذاری سیستم در حالت استاندارد یک بارگذاری ملایم و سبک بوده است، اثرات غیر خطی سیستم قابل چشم‌پوشی بوده و نتایج دو تحلیل بر هم منطبق می‌باشد.



شکل (۲-۵). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم به ازای بارگذاری سبک

همچنین به منظور بررسی نحوه تأثیر SVC در تحلیل پایداری ولتاژ، می‌توان روابط پخش بار SVC را در معادلات وارد کرده و نتایج بدست آمده را در دو حالت تحلیل خطی و غیر خطی با نتایج بدست آمده از حالت بدون SVC مقایسه کرد.

۵-۴-۲- حالت دوم - سیستم با بارگذاری سنگین

همانگونه که در فصل سوم توضیح داده شد با افزایش بارگذاری سیستم به نقطه بحرانی پایداری ولتاژ نزدیک می‌شود. از طرف دیگر با افزایش بارگذاری سیستم از نقطه تعادل خود کمی دور شده و اثرات غیرخطی آن نمود بیشتری پیدا می‌کند.

برای بررسی کارایی روش ارائه شده در این پروژه و برتری آن بر روش‌های تحلیل خطی، مکان‌یابی SVC در سیستم ۳۹ باس تحت آزمایش در شرایط بارگذاری یزر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- افزایش مقادیر توان مصرفی در باس‌های ۳ و ۴ به میزان سه برابر حالت استاندارد
- افزایش توان‌های تزریقی در باس‌های ۳۲ و ۳۷ به میزان سه برابر حالت استاندارد

با حل معادلات پخش بار مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین محاسبه می‌گردد (جدول (۵-۴)). از روی این نتایج ملاحظه می‌شود که کمترین مقدار ویژه برابر $0/5342$ می‌باشد. این مقدار ویژه نسبت به حالت بارگذاری استاندارد کمتر است و نشان دهنده این است که سیستم به حد پایداری خود نزدیک شده است. ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌های مختلف در این مد بحرانی توسط برنامه نوشته شده در نرم افزار MATLAB محاسبه گردیده و در جدول (۵-۵) نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر، نتایج حاصل از تحلیل خطی و تحلیل غیر خطی (فرم نرمال) بر روی یک نمودار ترسیم شده است (شکل (۵-۴)).

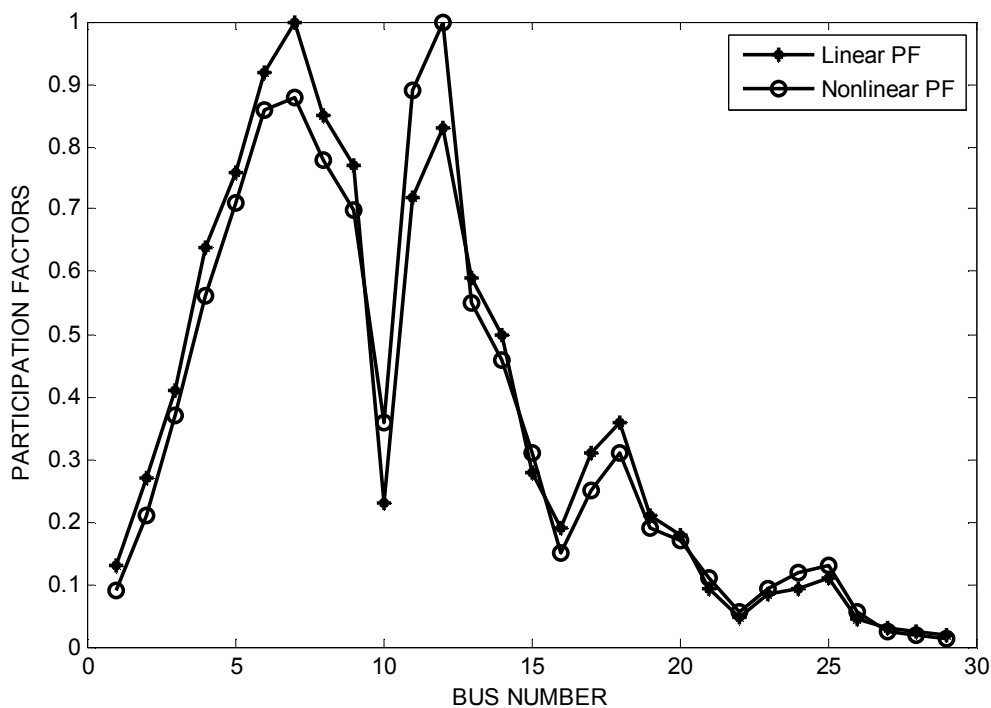
جدول (۴-۵). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری سنگین

Eigenvalues			
887.24 + 51.375i	887.24 - 51.375i	680.51 + 53.308i	680.51 - 53.308i
557.09 + 25.558i	557.09 - 25.558i	450.82 + 30.427i	450.82 - 30.427i
349.21 + 24.806i	349.21 - 24.806i	321.2 + 15.136i	321.2 - 15.136i
313.54 + 17.793i	313.54 - 17.793i	248.4 + 91.341i	248.4 - 91.341i
276.16 + 10.395i	276.16 - 10.395i	229.52 + 7.1412i	229.52 - 7.1412i
199.4 + 8.5726i	199.4 - 8.5726i	192.15 + 11.915i	192.15 - 11.915i
184.92 + 18.656i	184.92 - 18.656i	179.23 + 14.999i	179.23 - 14.999i
146.86 + 5.5347i	146.86 - 5.5347i	133.64 + 4.4945i	133.64 - 4.4945i
129.2	125.99	120.95	112.45
105.28 + 1.5375i	105.28 - 1.5375i	99.252	0.53424
3.6811	4.8439	7.4827	8.9635
11.035	14.562	15.934	27.875
83.614	30.365	77.905	76.04
32.87	42.648	62.726	35.396 + 0.63464i
35.396 - 0.63464i	39.899	59.244	54.226
67.545	70.3 + 0.39625i	70.3 - 0.39625i	55.535
37.002	37.435	81.395	

جدول (۵-۵). مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم به ازای بارگذاری

سنگین

BUS NO.	LINEAR PF	NONLINEAR PF	BUS NO.	LINEAR PF	NONLINEAR PF
BUS 1	0.09	0.13	BUS 16	0.15	0.19
BUS 2	0.21	0.27	BUS 17	0.25	0.31
BUS 3	0.37	0.41	BUS 18	0.31	0.36
BUS 4	0.56	0.64	BUS 19	0.19	0.21
BUS 5	0.71	0.76	BUS 20	0.17	0.18
BUS 6	0.86	0.92	BUS 21	0.11	0.092
BUS 7	0.88	1.00	BUS 22	0.055	0.046
BUS 8	0.78	0.85	BUS 23	0.093	0.085
BUS 9	0.7	0.77	BUS 24	0.12	0.093
BUS 10	0.36	0.23	BUS 25	0.13	0.11
BUS 11	0.89	0.72	BUS 26	0.056	0.044
BUS 12	1.00	0.83	BUS 27	0.024	0.031
BUS 13	0.55	0.59	BUS 28	0.019	0.024
BUS 14	0.46	0.5	BUS 29	0.014	0.018
BUS 15	0.31	0.28			



شکل (۴-۵). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم به ازای بارگذاری سنگین

همانگونه که انتظار می‌رفت به دلیل افزایش اثرات غیر خطی ناشی از بارگذاری سنگین تر سیستم، تفاوت بین ضرایب مشارکت در دو حالت خطی و غیر خطی بیشتر از حالت بارگذاری استاندارد است. از روی نمودار ضرایب مشارکت خطی، باس ۱۲ با داشتن بیشترین ضریب مشارکت در مد بحرانی سیستم به عنوان باس مناسب جهت نصب SVC معرفی می‌شود. این در حالیست که تحلیل غیرخطی باس ۷ را به عنوان نقطه بهینه نصب SVC تعیین می‌کند.

از آنجاییکه تحلیل غیر خطی علاوه بر دربر داشتن اطلاعات تحلیل خطی، اطلاعات کاملتری از سیستم در خود دارد، لذا نتیجه بدست آمده از آن قابل اعتماد تر به نظر می‌رسد. اما برای حصول اطمینان بیشتر از

نتایج تحلیل غیرخطی می‌توان از تحلیل مقدار ویژه سیستم در حالت نصب SVC در هر دو باس کاندیدا و بصورت جداگانه استفاده کرد.

۵-۴-۲-۱- استفاده از شاخص مقدار ویژه برای ارزیابی نتایج

در قسمت قبل ملاحظه گردید که انجام تحلیل خطی و غیرخطی پایداری ولتاژ در یک سیستم تحت استرس زیاد به دو نتیجه متفاوت برای تعیین نقطه نصب SVC انجامید. برای ارزیابی میزان درستی این نتایج، مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم یک بار با فرض نصب SVC در باس ۱۲ بار دیگر با نصب SVC در باس ۷ محاسبه گردیده و در جداول (۵-۶) و (۵-۷) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در صورتیکه SVC در باس ۷ نصب شود، مد بحرانی سیستم نسبت به حالتی که SVC در باس ۱۲ نصب شود اندازه بیشتری دارد و لذا سیستم پایداری ولتاژ بهتری دارد. این امر نشان دهنده این است که نتیجه بدست آمده از تحلیل غیرخطی صحیح‌تر است و همچنین نشان می‌دهد که کاربرد روش‌های خطی معمول در تحلیل پایداری سیستم تحت استرس ممکن است نتایج غیر دقیق و حتی نادرستی به همراه داشته باشد.

جدول (۵-۶). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری سنگین و با نصب SVC در باس ۷

Eigenvalues			
1056.5 + 78.416i	1056.5 - 78.416i	802.61 + 69.59i	802.61 - 69.59i
690.57 + 46.021i	690.57 - 46.021i	534.06 + 44.165i	534.06 - 44.165i
419.32 + 35.424i	419.32 - 35.424i	399.9 + 32.01i	399.9 - 32.01i
367.05 + 9.2461i	367.05 - 9.2461i	346.09 + 23.896i	346.09 - 23.896i
296.86 + 100.67i	296.86 - 100.67i	252.95	239.89 + 35.735i
239.89 - 35.735i	238.01	230.37 + 18.383i	230.37 - 18.383i
215.14 + 17.917i	215.14 - 17.917i	210.29 + 3.608i	210.29 - 3.608i
182.14 + 11.532i	182.14 - 11.532i	158.75 + 4.1879i	158.75 - 4.1879i
145.33 + 7.704i	145.33 - 7.704i	140.29	131.6
125.97	123.62	117.85	0.75684
6.0746	7.199	10.105	11.406
13.346	94.78 + 1.5093i	94.78 - 1.5093i	90.035 + 2.636i
90.035 - 2.636i	18.455	20.329	81.827 + 0.92022i
81.827 - 0.92022i	76.611	70.605	63.987 + 1.933i
63.987 - 1.933i	32.954	33.841	50.724
64.315	40.815 + 0.73946i	40.815 - 0.73946i	46.5
41.622	45.261	42.407	

جدول (۷-۵). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری سنگین و با نصب SVC در باس ۱۲

Eigenvalues			
956.01 + 68.457i	956.01 - 68.457i	738.67 + 64.312i	738.67 - 64.312i
662.29 + 45.801i	662.29 - 45.801i	484.99 + 38.583i	484.99 - 38.583i
383.33 + 32.163i	383.33 - 32.163i	378.32 + 31.211i	378.32 - 31.211i
361.06 + 11.585i	361.06 - 11.585i	287.91 + 101.02i	287.91 - 101.02i
309.6 + 21.458i	309.6 - 21.458i	247.6	224.14 + 32.773i
224.14 - 32.773i	236.89	207.26 + 17.611i	207.26 - 17.611i
210.49 + 16.211i	210.49 - 16.211i	208.38 + 5.306i	208.38 - 5.306i
171.59 + 10.482i	171.59 - 10.482i	154.83 + 5.3609i	154.83 - 5.3609i
138.41	132.47 + 4.4601i	132.47 - 4.4601i	130.1
119.33	117.01 + 2.1508i	117.01 - 2.1508i	0.63441
94.46	5.7324	6.6532	8.8356
11.016	12.418	86.315 + 2.9115i	86.315 - 2.9115i
83.793	78.904 + 0.58354i	78.904 - 0.58354i	75.53
17.539	19.55	68.165	61.516 + 2.5081i
61.516 - 2.5081i	49.398	44.756	38.001 + 1.084i
38.001 - 1.084i	32.544 + 0.063469i	32.544 - 0.063469i	62.234
40.526	41.044	41.686	

۵-۴-۳- حالت سوم - سیستم در حالت بارگذاری نزدیک به حد بحرانی

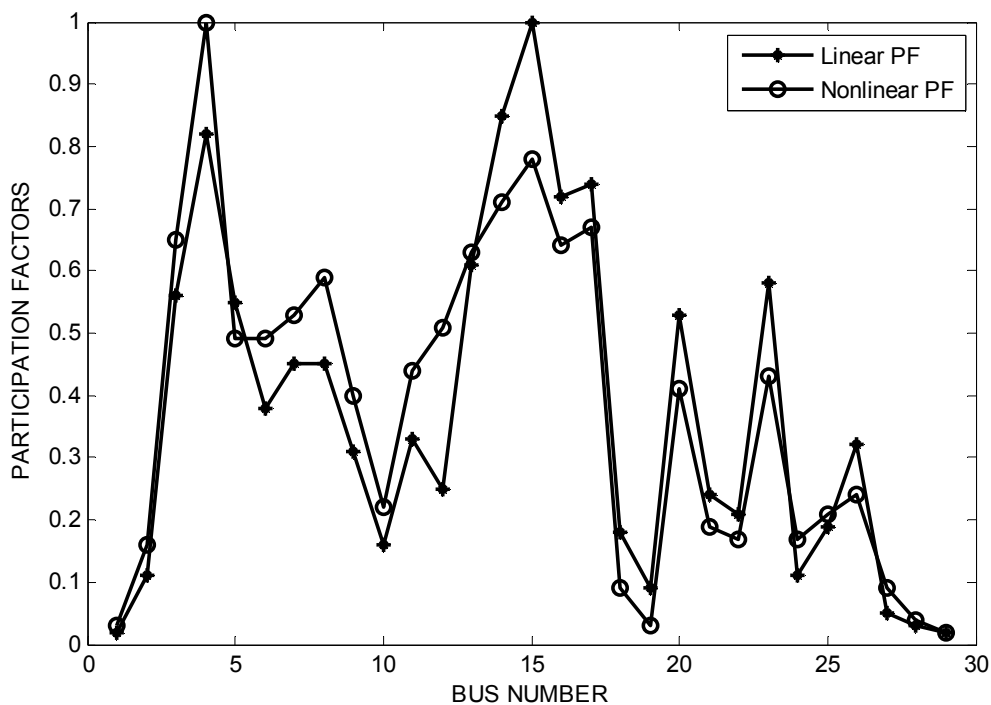
در این حالت بارهای باس های ۳ و ۴ و توان تزریقی به باس های ۳۰ و ۳۵ به ۳/۵ برابر حالت استاندارد افزایش داده می شوند. فرض می شود که ضریب توان باس ها مطابق با حالت استاندارد است. مطابق حالت قبل پخش بار سیستم توسط برنامه انجام شده و مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم بصورت زیر محاسبه گردیده است.

جدول (۵-۸). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری نزدیک به حد بحرانی

Eigenvalues			
819.97	736.85	606.44 + 23.388i	606.44 - 23.388i
532.71	490.47	411.79	381.35
316.35	309.46 + 13.848i	309.46 - 13.848i	298.81
295.17	234.09 + 88.073i	234.09 - 88.073i	273.34
253.07	223.67 + 8.5289i	223.67 - 8.5289i	217.74
195.7 + 9.3645i	195.7 - 9.3645i	176.69	171.88 + 14.3i
171.88 - 14.3i	163.9 + 9.1138i	163.9 - 9.1138i	154.32
137.43	131.07	127.76	125.08
123.39	120.78	111.33	98.304 + 1.0928i
98.304 - 1.0928i	92.642	91.275	0.38983
2.7058	4.1592	6.578	8.0312
9.8002	12.856	14.318	78.841
72.375 + 0.7209i	72.375 - 0.7209i	49.9 + 1.2218i	49.9 - 1.2218i
26.052	66.35	58.278 + 0.90288i	58.278 - 0.90288i
63.122	40.117	28.882	29.709
37.722	32.121 + 0.13139i	32.121 - 0.13139i	33.304
35.204	77.359	61.002	

جدول (۵-۹). مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم به ازای بارگذاری نزدیک به حد بحرانی

BUS NO.	LINEAR PF	NONLINEAR PF	BUS NO.	LINEAR PF	NONLINEAR PF
BUS 1	0.02	0.3	BUS 16	0.72	0.64
BUS 2	0.11	0.16	BUS 17	0.74	0.67
BUS 3	0.56	0.65	BUS 18	0.18	0.09
BUS 4	0.82	1.00	BUS 19	0.091	0.03
BUS 5	0.55	0.49	BUS 20	0.53	0.41
BUS 6	0.38	0.49	BUS 21	0.24	0.19
BUS 7	0.45	0.53	BUS 22	0.21	0.17
BUS 8	0.45	0.59	BUS 23	0.58	0.43
BUS 9	0.31	0.4	BUS 24	0.11	0.17
BUS 10	0.16	0.22	BUS 25	0.19	0.21
BUS 11	0.33	0.44	BUS 26	0.32	0.19
BUS 12	0.25	0.51	BUS 27	0.05	0.09
BUS 13	0.61	0.63	BUS 28	0.03	0.04
BUS 14	0.85	0.71	BUS 29	0.02	0.02
BUS 15	1.00	0.78			



شکل (۵-۵). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم به ازای بارگذاری نزدیک به حد بحرانی

۵-۳-۱- استفاده از شاخص مقدار ویژه برای ارزیابی نتایج

همانند حالت بارگذاری سنگین در این قسمت برای ارزیابی میزان درستی تحلیل ضرایب مشارکت از تحلیل مقادیر ویژه با فرض نصب SVC استفاده شده است. مدل در نظر گرفته شده برای SVC مشابه حالت بارگذاری سنگین می باشد.

جداول (۵-۱۰) و (۵-۱۱) مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم را به ازای نصب SVC بصورت جداگانه در باس های ۴ و ۱۵ نشان می دهد. این نتایج بیانگر این است که با نصب SVC در باس ۴ مقادیر ویژه مربوط به مد بحرانی سیستم از محورهای مختصات دور شده و حاشیه پایداری ولتاژ افزایش یافته است و از این رو نتیجه بدست آمده از تحلیل غیر خطی صحیح تر است.

جدول (۵-۱۰). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری نزدیک به حد بحرانی و با نصب SVC در باس ۴

Eigenvalues			
957.83 + 68.765i	957.83 - 68.765i	740.92 + 64.617i	740.92 - 64.617i
657.77 + 45.585i	657.77 - 45.585i	485.75 + 38.709i	485.75 - 38.709i
384.71 + 32.405i	384.71 - 32.405i	375.23 + 30.96i	375.23 - 30.96i
359.38 + 12.101i	359.38 - 12.101i	283.34 + 98.868i	283.34 - 98.868i
313 + 21.757i	313 - 21.757i	246.68	236.77
222.01 + 32.651i	222.01 - 32.651i	210.83 + 16.194i	210.83 - 16.194i
204.65 + 17.863i	204.65 - 17.863i	207.23 + 6.0167i	207.23 - 6.0167i
171.36 + 10.839i	171.36 - 10.839i	153.92 + 5.5028i	153.92 - 5.5028i
135.43	134.05 + 6.8567i	134.05 - 6.8567i	129.62
119.47	115.51 + 1.6045i	115.51 - 1.6045i	0.56757
5.6738	6.4528	9.1573	10.933
12.184	17.397	18.551	93.732
85.647 + 3.1026i	85.647 - 3.1026i	32.301 + 0.5381i	32.301 - 0.5381i
61.177 + 2.3533i	61.177 - 2.3533i	62.531	67.036
83.336	49.407	38.065 + 0.7513i	38.065 - 0.7513i
43.944	75.272	78.732 + 0.23041i	78.732 - 0.23041i
39.564	41.216	41.32	

جدول (۵-۱۱). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت بارگذاری نزدیک به حد بحرانی و با نصب SVC در باس ۱۵

Eigenvalues			
887.76 + 51.61i	887.76 - 51.61i	691.68 + 55.915i	691.68 - 55.915i
614.71 + 4i	614.71 - 4i	451.14 + 30.529i	451.14 - 30.529i
356.54 + 26.891i	356.54 - 26.891i	349.04 + 27.481i	349.04 - 27.481i
344.56 + 14.903i	344.56 - 14.903i	271.1 + 97.304i	271.1 - 97.304i
285.14 + 15.58i	285.14 - 15.58i	236.59 + 3.4296i	236.59 - 3.4296i
205.78 + 28.107i	205.78 - 28.107i	204.42 + 7.1849i	204.42 - 7.1849i
195.42 + 16.65i	195.42 - 16.65i	194.21 + 13.494i	194.21 - 13.494i
159.24 + 8.8191i	159.24 - 8.8191i	145.6 + 6.1434i	145.6 - 6.1434i
132.07	128.25	123.44 + 3.3733i	123.44 - 3.3733i
112.32	109.66 + 2.5511i	109.66 - 2.5511i	0.49751
5.0411	5.6394	8.3931	10.178
11.398	16.014	17.46	89.977
30.549	58.239 + 1.9184i	58.239 - 1.9184i	31.405
60.709	64.509	47.15	80.987 + 0.78424i
80.987 - 0.78424i	71.949	42.203	35.774 + 0.36401i
35.774 - 0.36401i	78.444	75.053	76.3
37.543	39.747	38.14	

۵-۵- بررسی اثر مدل‌سازی بار به ازای شرایط مختلف بارگذاری در سیستم بر مکان‌یابی SVC با استفاده از تحلیل فرم نرمال

در این قسمت به منظور بررسی نحوه تأثیر مدل‌سازی بار بر نتایج با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی، مکان-یابی به ازای حالت‌های زیر انجام گرفته است :

- مدل‌سازی با فرض غالب بودن بارهای جریان ثابت

الف- شرایط بارگذاری استاندارد (سبک)

ب- شرایط بارگذاری حالت دوم (سنگین)

- مدل‌سازی با فرض غالب بودن بارهای امیدانس ثابت

الف- شرایط بارگذاری استاندارد (سبک)

ب- شرایط بارگذاری حالت دوم (سنگین)

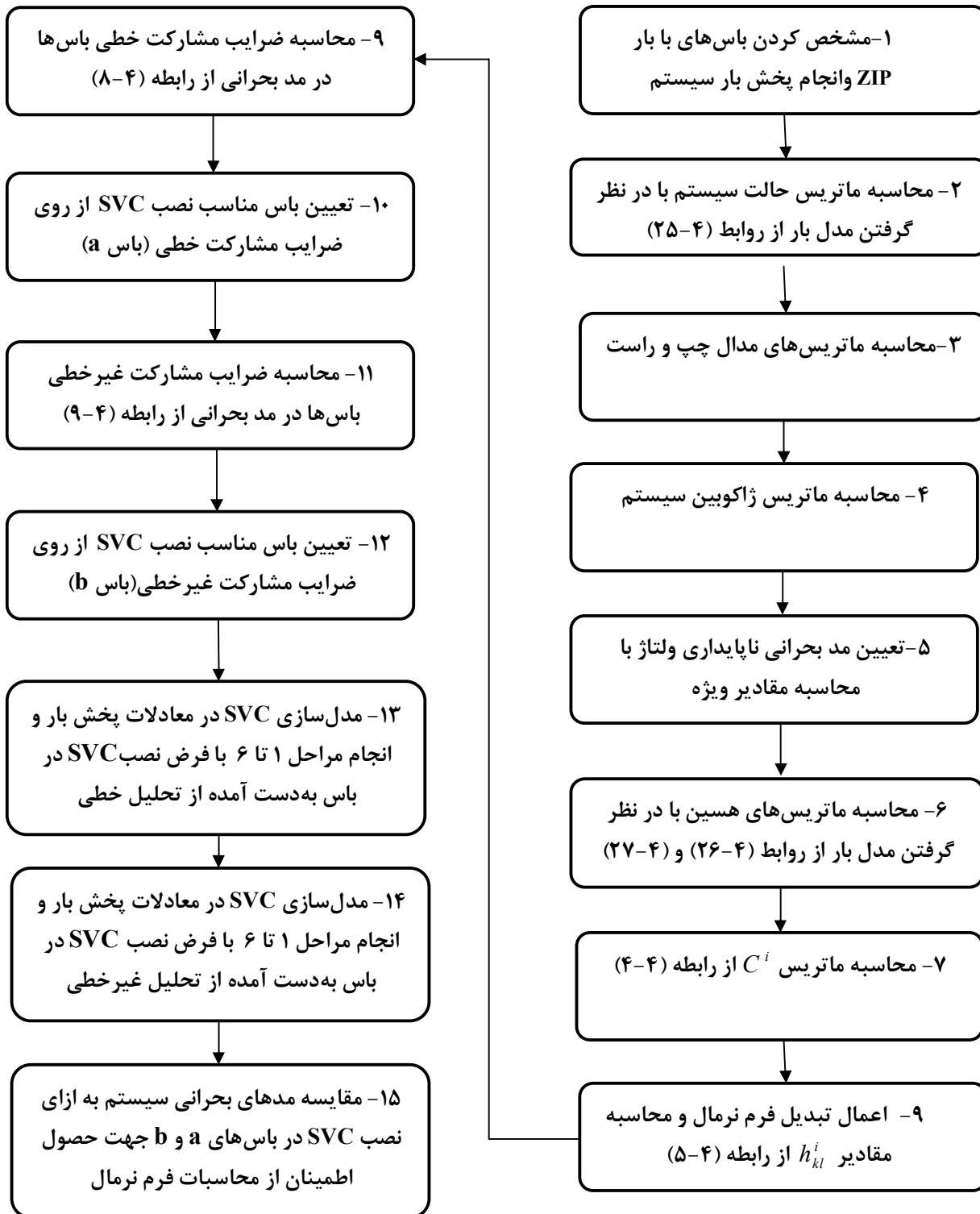
- مدل‌سازی با فرض غالب بودن بارهای توان ثابت

الف- شرایط بارگذاری استاندارد (سبک)

ب- شرایط بارگذاری حالت دوم (سنگین)

۵-۵-۱- مراحل شبیه‌سازی مسأله مکان‌یابی SVC با در نظر گرفتن مدل بار

بر مبنای روش ارائه شده در فصل چهارم، مراحل شبیه‌سازی مسأله مکان‌یابی SVC با در نظر گرفتن مدل بار بر روی سیستم تحت آزمایش در شکل (۵-۶) نشان داده شده است. قابل ذکر است که ماتریس حالت سیستم و ماتریس‌های هسین در حالت مدل‌سازی بار مطابق روابط (۴-۲۵) تا (۴-۲۷) پس از اعمال چند تغییر جزئی در ماتریس‌های هسین محاسبه شده در بخش (۵-۴) به دست می‌آیند.



شکل (۵-۶). مراحل شبیه‌سازی مکان‌یابی SVC با در نظر گرفتن مدل بار

۵-۵-۲- نحوه انتخاب باس هایی که مدلسازی بار در آن ها انجام می شود

در مطالعات مربوط به تأثیر مدلسازی بار بر شبکه بطور متداول محققان، شبکه را به نواحی مختلف تقسیم بندی کرده و مدل های مورد نظر را بر حسب کاربرد به نواحی خاصی محدود می کنند. مزیت این روش در این است که با اعمال مدلسازی به یک ناحیه خاص، نتایج حاصل از تحلیل سیستم به نحو مطلوبتری اثرات مدلسازی را نشان می دهد و نتیجه گیری بهتری می توان انجام داد. همچنین با این روش بار محاسباتی تحلیل هم کاهش می یابد.

در این پروژه از آنجاییکه هدف، یافتن بهترین نقطه نصب SVC به منظور بهبود پایداری ولتاژ می باشد و روش انتخاب باس های مناسب بر مبنای میزان مشارکت آن ها در ایجاد مد بحرانی پایداری ولتاژ استوار است، تعدادی از باس هایی که در حالت استاندارد بارگذاری بیشترین سهم را در ایجاد این مد دارند انتخاب کرده و مدلسازی بار تنها در این باس ها انجام می شود. باس های دیگر سیستم مطابق حالت متداول به شکل بار توان ثابت مدلسازی می شوند. باسهای انتخاب شده در شبیه سازی سیستم ۳۹ باس تحت آزمایش باس های ۶ و ۷ و ۱۲ و ۱۳ می باشند.

۵-۵-۳- مدلسازی بار با فرض غالب بودن بارهای جریان ثابت

در این حالت ضرایب رابطه (۴-۲۶) به صورت زیر انتخاب شده است :

$$\begin{cases} P_1 = 0.1 \\ P_2 = 0.7 \\ P_3 = 0.2 \end{cases}, \begin{cases} Q_1 = 0.1 \\ Q_2 = 0.7 \\ Q_3 = 0.2 \end{cases}$$

مطابق بخش قبل معادلات پخش بار حل گردیده و مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم محاسبه شده است. جدول (۵-۱۲) مقادیر ویژه مربوط به شرایط بارگذاری استاندارد و جدول (۵-۱۳) مقادیر ویژه مربوط به شرایط بارگذاری سنگین را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که مطابق انتظار کوچکترین

مقدار ویژه به ازای شرایط بارگذاری سنگین مقادیر کوچکتری نسبت به اندازه مقدار ویژه مد بحرانی در شرایط کاری استاندارد دارد.

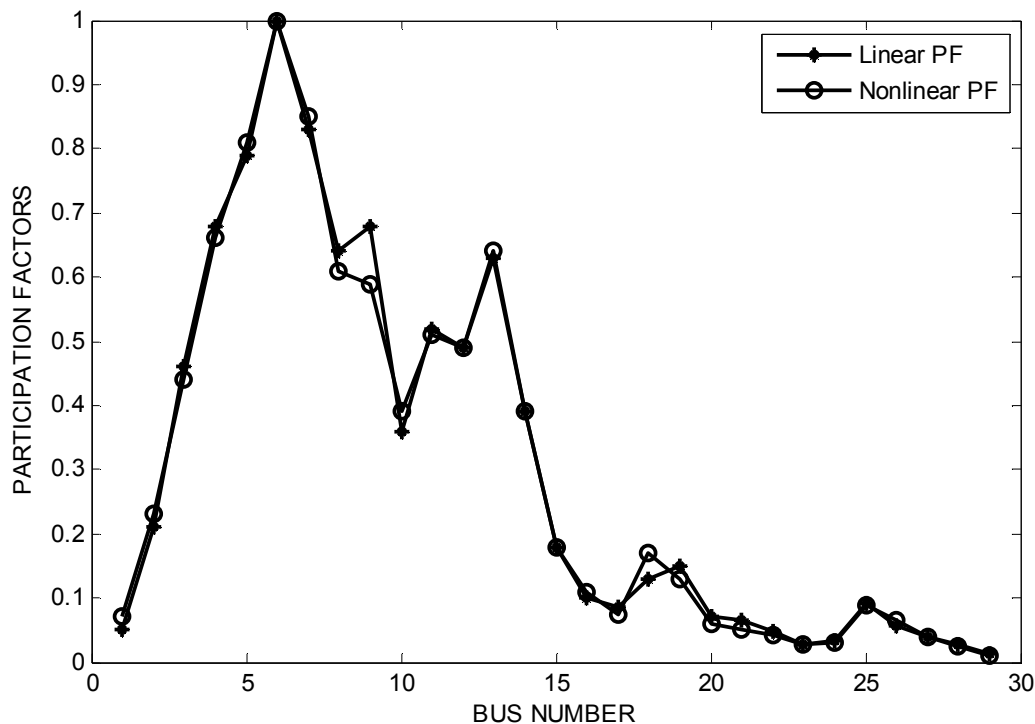
جدول (۵-۱۲). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت مدلسازی بار جریان ثابت در شرایط بارگذاری سبک (استاندارد)

Eigenvalues			
835.28 + 26.279i	835.28 - 26.279i	647.86 + 43.575i	647.86 - 43.575i
541.26 + 17.09i	541.26 - 17.09i	425.36 + 20.343i	425.36 - 20.343i
330.92 + 18.132i	330.92 - 18.132i	317.21 + 14.78i	317.21 - 14.78i
301.94 + 12.311i	301.94 - 12.311i	242.67 + 90.166i	242.67 - 90.166i
265.24	250.49	227.5 + 7.7256i	227.5 - 7.7256i
198.04 + 8.8927i	198.04 - 8.8927i	179.83 + 16.57i	179.83 - 16.57i
181.11 + 6.5256i	181.11 - 6.5256i	172.6 + 11.842i	172.6 - 11.842i
141.94 + 3.6083i	141.94 - 3.6083i	130.68 + 3.6477i	130.68 - 3.6477i
127.4	124.12	115.02	0.48044
3.5118	4.7284	7.0887	8.7101
10.291	14.019	15.233	107.45
102.59 + 1.8386i	102.59 - 1.8386i	96.143	81.854
80.075	27.146	75.035 + 0.44267i	75.035 - 0.44267i
29.96	31.913	41.108	52.195
33.83 + 0.80394i	33.83 - 0.80394i	38.976	54.305
66.717	64.937	69.53	61.081
35.543	36.286	58.873	

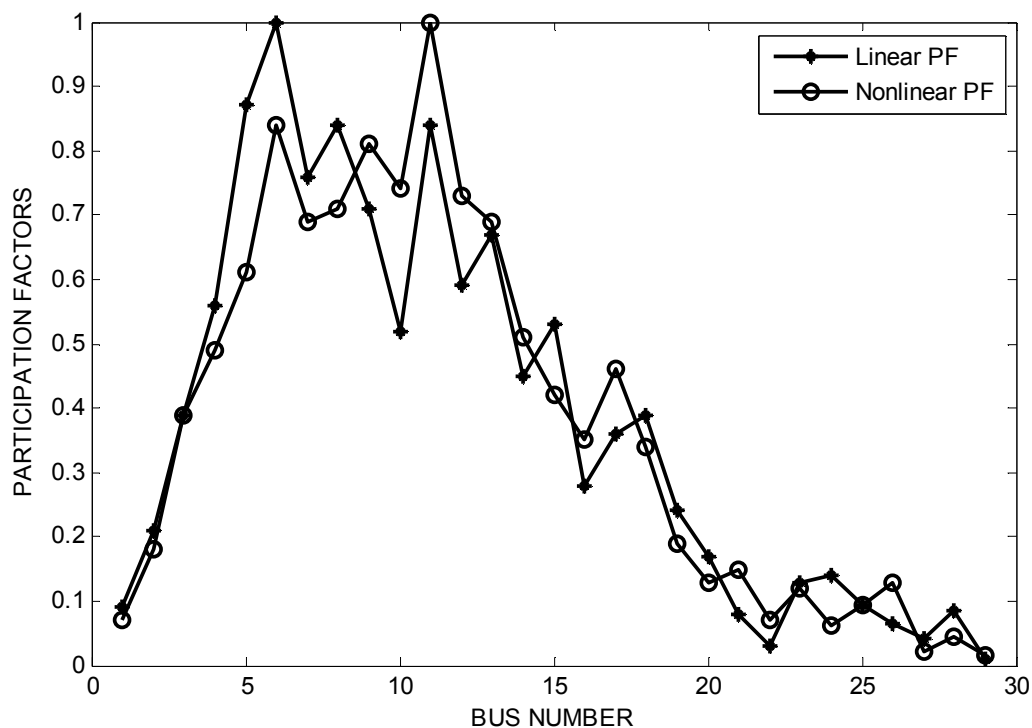
جدول (۵-۱۳). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت مدلسازی بار جریان ثابت در شرایط بارگذاری سنگین

Eigenvalues			
827.2	767.25	626.22 + 34.738i	626.22 - 34.738i
534.76 + 11.685i	534.76 - 11.685i	408.73	404.02
319.19 + 11.388i	319.19 - 11.388i	315.52 + 14.611i	315.52 - 14.611i
298.16 + 9.7546i	298.16 - 9.7546i	240.99 + 89.777i	240.99 - 89.777i
261.32	235.67	226.6 + 7.9026i	226.6 - 7.9026i
197.6 + 8.9883i	197.6 - 8.9883i	178.18 + 16.263i	178.18 - 16.263i
178.72	171.7 + 10.57i	171.7 - 10.57i	167.83
139.96 + 1.8146i	139.96 - 1.8146i	129.39 + 2.8304i	129.39 - 2.8304i
125.9	123.36	112.62	106.06
100.78 + 1.9374i	100.78 - 1.9374i	94.683	0.40448
3.4757	4.6857	6.9751	8.6174
9.9467	13.629	14.846	81.234
79.363	26.836	29.704	31.179
40.794	51.245	73.851 + 0.54369i	73.851 - 0.54369i
38.629	32.898 + 0.72776i	32.898 - 0.72776i	53.733
59.916	34.292	36	69.101
64.927	58.758	63.893	

شکل های (۷-۵) و (۸-۵) مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس ها را در ایجاد مد بحرانی سیستم در حالت های مختلف بارگذاری سیستم نشان می دهد. از روی این شکل ها ملاحظه می شود که در حالت بارگذاری استاندارد تحلیل خطی و غیر خطی باس ۶ را به عنوان باس مناسب جهت نصب SVC معرفی می کند، اما در شرایط بارگذاری سنگین تحلیل خطی باس ۶ و تحلیل غیر خطی باس ۱۱ را به عنوان باس مناسب معرفی می کنند.



شکل (۷-۵). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم در مدلسازی جریان ثابت به ازای بارگذاری استاندارد



شکل (۵-۸). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم در مدلسازی جریان ثابت به ازای بارگذاری سنگین

۵-۴-۵- مدلسازی بار با فرض غالب بودن بارهای امیدانس ثابت

در این حالت ضرایب رابطه (۴-۲۴) بصورت زیر انتخاب گردیده است.

$$\begin{cases} P_1 = 0.7 \\ P_2 = 0.1 \\ P_3 = 0.2 \end{cases}, \begin{cases} Q_1 = 0.7 \\ Q_2 = 0.1 \\ Q_3 = 0.2 \end{cases}$$

جدول (۵-۱۴) مقادیر ویژه مربوط به شرایط بارگذاری استاندارد و جدول (۵-۱۵) مقادیر ویژه مربوط به شرایط بارگذاری سنگین را نشان می‌دهد. شکل‌های (۵-۹) و (۵-۱۰) مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیرخطی ولتاژ باس‌ها را در ایجاد مد بحرانی در دو حالت بارگذاری مختلف نشان می‌دهد. از روی این شکل‌ها در شرایط بارگذاری سبک با تحلیل خطی و غیرخطی باس ۵ به عنوان باس

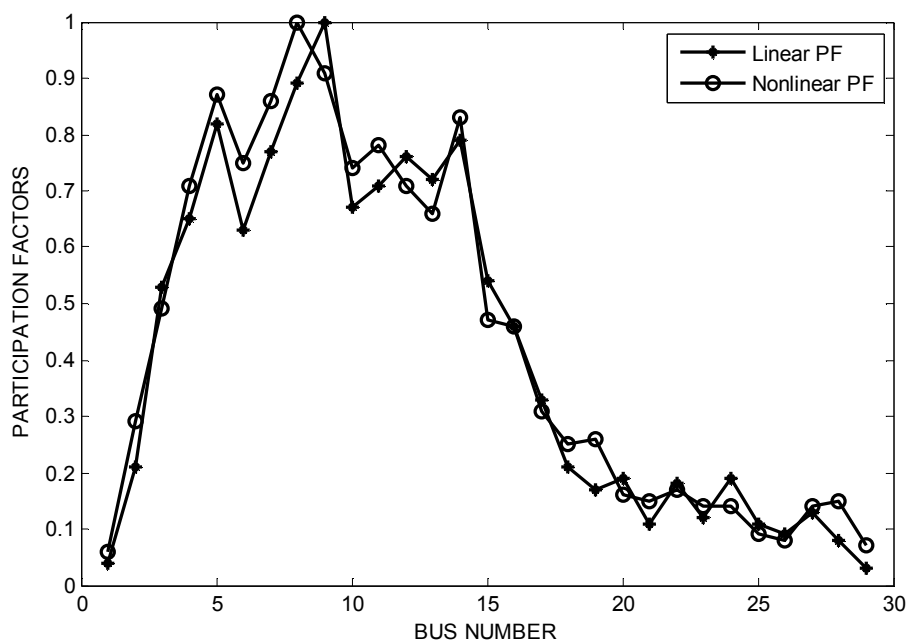
مناسب برای نصب SVC تعیین می‌گردد اما در حالت بارگذاری سنگین، تحلیل خطی باس ۹ و تحلیل غیرخطی باس ۱۲ را باس مناسب تشخیص می‌دهند.

جدول (۵-۱۴). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت مدل‌سازی بار امیدانس ثابت در شرایط بارگذاری سبک (استاندارد)

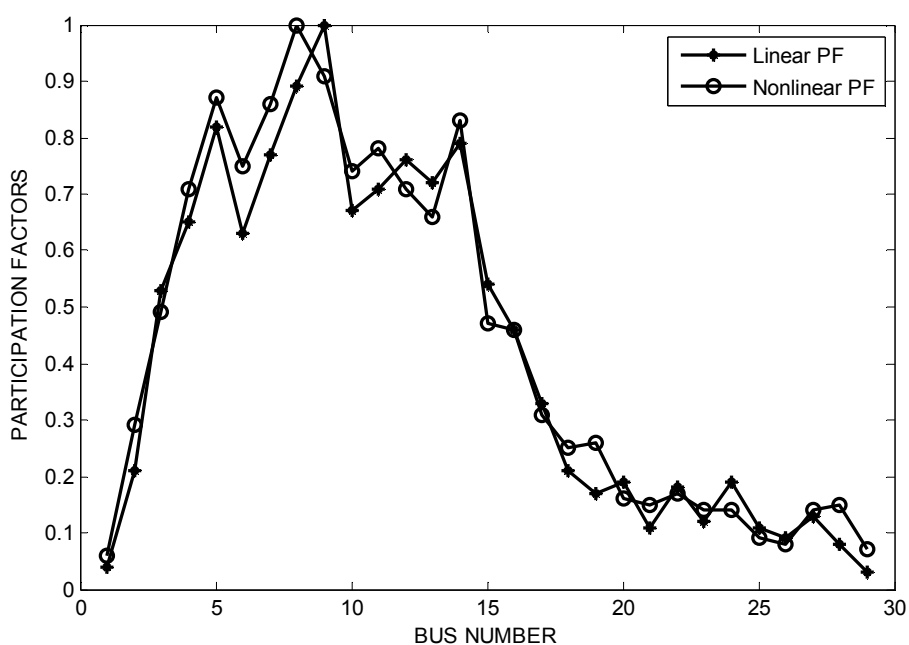
Eigenvalues			
822.36	813.52	638.16 + 39.927i	638.16 - 39.927i
538.71 + 15.219i	538.71 - 15.219i	416.7 + 15.027i	416.7 - 15.027i
325.68 + 15.528i	325.68 - 15.528i	316.55 + 14.716i	316.55 - 14.716i
300.54 + 11.432i	300.54 - 11.432i	242.08 + 90.027i	242.08 - 90.027i
263.89	243.65	227.15 + 7.8048i	227.15 - 7.8048i
197.88 + 8.9275i	197.88 - 8.9275i	179.27 + 16.519i	179.27 - 16.519i
177.67 + 3.9764i	177.67 - 3.9764i	172.29 + 11.005i	172.29 - 11.005i
141.13 + 2.9933i	141.13 - 2.9933i	130.14 + 3.3568i	130.14 - 3.3568i
126.71	123.8	113.68	107.28
101.84 + 1.91i	101.84 - 1.91i	95.553	0.44296
3.5202	4.7248	7.0502	8.6828
10.14	13.839	15.066	81.64
79.758	27.022	74.504 + 0.54186i	74.504 - 0.54186i
29.862	31.646	40.998	51.779
33.389 + 0.79076i	33.389 - 0.79076i	38.851	54.151
65.924	64.514	60.572	69.396
58.804	34.98	36.168	

جدول (۵-۱۵). مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین در حالت مدل‌سازی بار امیدانس ثابت در شرایط بارگذاری سنگین

Eigenvalues			
987.37 + 73.177i	987.37 - 73.177i	754.73 + 66.294i	754.73 - 66.294i
656.44 + 45.492i	656.44 - 45.492i	500.38 + 41.011i	500.38 - 41.011i
391.81 + 33.339i	391.81 - 33.339i	371.88 + 30.493i	371.88 - 30.493i
359.87 + 11.955i	359.87 - 11.955i	317.73 + 21.454i	317.73 - 21.454i
274.91 + 97.772i	274.91 - 97.772i	246.46	236.76
220.56 + 31.207i	220.56 - 31.207i	214.87 + 17.585i	214.87 - 17.585i
202.79 + 17.754i	202.79 - 17.754i	206.68 + 6.2947i	206.68 - 6.2947i
171.8 + 10.156i	171.8 - 10.156i	154.06 + 5.4383i	154.06 - 5.4383i
134.93	134.46 + 1.1227i	134.46 - 1.1227i	130.21
120	115.02 + 2.4408i	115.02 - 2.4408i	0.68834
5.6369	6.242	9.0465	10.933
12.324	94.155	17.221	18.503
85.159 + 2.9788i	85.159 - 2.9788i	84.841	67.471
31.905 + 0.54748i	31.905 - 0.54748i	60.926 + 2.4268i	60.926 - 2.4268i
49.794	79.561	44.173	37.264
38.786 + 0.6238i	38.786 - 0.6238i	62.205	75.365
77.748	42.087	41.425	



شکل (۵-۹). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم در مدلسازی امیدانس ثابت به ازای بارگذاری سبک



شکل (۵-۱۰). مقایسه مقادیر نرمالیزه شده ضرایب مشارکت خطی و غیر خطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی سیستم در مدلسازی امیدانس ثابت به ازای بارگذاری سنگین

۵-۵-۵- مدلسازی بار با فرض غالب بودن بارهای توان ثابت

نتایج این حالت مشابه نتایج بدست آمده در بخش‌های (۲-۳-۵) و (۳-۳-۵) می باشد.

۵-۶- تحلیل نتایج شبیه سازی مدل سازی بار

- مقایسه مقادیر بدست آمده از مدلسازی حالت ۱ (جداول (۵-۱۲) و (۵-۱۳)) با مدلسازی بار

بصورت توان ثابت (حالت ۳) نشان می دهد که در صورتیکه بارهای سیستم بصورت جریان ثابت باشند، مقدار ویژه متناظر با مد بحرانی سیستم نسبت به حالتی که بارها بصورت توان ثابت باشند، اندازه کمتری دارد و لذا سیستم به حد ناپایداری نزدیک تر است. این امر به ازای هر دو شرایط بارگذاری سبک و سنگین برقرار است.

در [۴۱] نحوه تأثیرگذاری مدل بار بر پایداری ولتاژ یک سیستم تک ژنراتوری متصل به باس بی نهایت با تحلیل منحنی های V-P و V-Q بررسی شده است و نشان داده شده است که در یک سیستم ساده با افزایش مقدار بار، در صورتی که بارها جریان ثابت باشند، سیستم نسبت به حالتی که بارها بصورت توان ثابت و یا امپدانس ثابت هستند زودتر پایداری خود را از دست می دهد.

- مقایسه نتایج مبتنی بر تحلیل غیر خطی در حالت ۱ و در شرایط بارگذاری سبک با نتایج

تحلیل غیر خطی حالت ۳ نشان می دهد که ضرایب مشارکت در هر دو حالت باس ۶ را به عنوان باس مناسب معرفی می کنند (علی‌رغم اینکه به ازای هر دو حالت نتیجه تحلیل خطی و غیرخطی متفاوت است). این امر نشان دهنده این است که مدلسازی بار بصورت توان ثابت علی‌رغم اینکه ممکن است نتیجه مکان‌یابی را تغییر دهد، ولی این تغییر ناشی از پر تأثیر بودن اثرات غیر خطی نوع مدلسازی مربوطه نمی باشد. این امر می تواند به این دلیل باشد

که توان‌ها در این مدل‌سازی بصورت خطی ($P=KV$) با ولتاژها مرتبط هستند و لذا جملات

که $\frac{\partial^2 L}{\partial V^2}$ تعداد زیادی از عناصر ماتریس هسین را تشکیل می‌دهند، برابر با صفر می‌باشند.

- نتایج بدست آمده از تحلیل خطی و غیر خطی هر دو نوع بارگذاری در حالت ۲ نشان می‌دهد که در صورتی که بارهای سیستم از نوع امپدانس ثابت باشند، مقدار ویژه متناظر با مد بحرانی سیستم نسبت به حالتی که بارها بصورت جریان ثابت و یا توان ثابت باشند مقدار بیشتری دارد و سیستم از لحاظ پایداری ولتاژ وضعیت بهتری دارد. این امر با نتیجه تحلیل منحنی‌های $V-P$ و $V-Q$ در [۴۳] همخوانی دارد.

- تحلیل غیر خطی سیستم در حالت ۲ و با بارگذاری سنگین باس ۱۲ را به عنوان باس مناسب جهت نصب SVC معرفی می‌کند. این نتیجه با نتیجه بدست آمده از حالت ۳ در شرایط بارگذاری سنگین متفاوت است و نشان می‌دهد که مدلسازی بار بصورت امپدانس ثابت، اثرات غیر خطی متفاوت با اثرات غیرخطی حالت مدلسازی بصورت توان ثابت دارد و می‌تواند نتیجه مکان‌یابی را تغییر دهد. دلیل این امر این است که در محاسبه عناصر

مربوط به ماتریس هسین جملات $\frac{\partial^2 L}{\partial V^2}$ ، $\frac{\partial^2 L}{\partial V \partial \theta}$ صفر نبوده و تأثیر خود را در تحلیل

غیرخطی فرم نرمال نشان می‌دهند.



فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این پروژه با به کارگیری روش فرم نرمال غیر هم‌ریخت، روش جهت تعیین نقطه بهینه نصب SVC به منظور بهبود پایداری ولتاژ سیستم قدرت ارائه گردید. در این روش با وارد کردن جملات درجه دو بسط سری تیلور نقش مشخصه‌های غیرخطی سیستم نیز در تحلیل پایداری ولتاژ و مکانیابی SVC مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این نقش مدلسازی بارهای سیستم در تعیین نقطه بهینه نصب SVC با استفاده از تحلیل غیرخطی ارائه شده مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. از تحلیل نتایج به دست آمده از تحلیل خطی و غیر خطی یک سیستم نمونه در حالت‌های مختلف بارگذاری نتایج زیر استخراج گردیده است:

الف) تحلیل مقادیر ویژه نشان داد که با افزایش میزان بارگذاری در شبکه مقدار ویژه متناظر با مد بحرانی ماتریس ژاکوبین سیستم به سمت ناپایداری می‌رود.

ب) مقایسه ضرایب مشارکت خطی و غیرخطی ولتاژ باس‌ها در مد بحرانی نشان داد که در حالتی که بارگذاری سیستم سبک باشد اثرات غیرخطی محاسبه شده بوسیله روش فرم نرمال نقش کمی در تعیین نقطه بهینه نصب SVC دارند و می‌توان در اینگونه موارد تحلیل خطی را به کار برد.

ج) تحلیل خطی و غیر خطی سیستم در شرایط بارگذاری سنگین حاکی از این بود که در صورت بارگذاری سنگین شبکه، اثرات غیرخطی محاسبه شده توسط روش فرم نرمال می‌توانند در تعیین محل نصب SVC تأثیرگذار باشند علاوه بر این آزمایش نصب SVC در باس‌های کاندید شده و تحلیل مقدار ویژه سیستم در این شرایط نشان داد که نتایج به دست آمده از تحلیل غیرخطی مبتنی بر روش فرم نرمال صحیح‌تر می‌باشند.

د) در شرایط بارگذاری سنگین ضرایب مشارکت غیرخطی اطلاعاتی از اثرات غیرخطی در اختیار قرار می‌دهد که از تحلیل خطی بدست نمی‌آیند.

ه) با استفاده از روش فرم نرمال می‌توان اثر متغیرهای دیگر دخیل در پایداری استاتیک ولتاژ و مکانیابی SVC را در نظر گرفت. این اثرات در شرایط بارگذاری سنگین می‌تواند نتیجه حاصل از تحلیل خطی را مورد چالش قرار دهد.

و) برخلاف روش فرم نرمال فضای برداری تحلیل پایداری استاتیک ولتاژ ارائه شده از آنجاییکه مبتنی بر معادلات پخش بار سیستم می‌باشد و این معادلات جبری و نه دیفرانسیلی می‌باشند، نیازی به روند پرزحمت محاسبه شرایط اولیه ندارد و بار اصلی محاسبات مربوط به محاسبه ماتریس هسین و ضرایب مشارکت غیرخطی می‌باشد.

ز) از آنجاییکه در تحلیل پایداری ولتاژ انجام شده، معیار انتخاب باس برای نصب SVC میزان مشارکت ولتاژ باس در بدترین مد (مدبحرانی) می‌باشد، در تحلیل مقادیر ویژه نیازی به محاسبه تمامی مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین سیستم نیست و این امر در سیستم‌های قدرت بسیار بزرگ مزیت بسیار مهمی به شمار می‌آید. روش‌های ریاضی مختلفی جهت محاسبه مقادیر ویژه بحرانی یک سیستم وجود دارد که بار محاسباتی این روش را به میزان زیادی کاهش می‌دهد.

ح) مقایسه مدل‌سازی‌های بار مختلف نشان داد که در حالت مدل‌سازی بارها بصورت جریان ثابت در همه شرایط بارگذاری، سیستم از لحاظ پایداری ولتاژ وضعیت بدتری دارد. از این منظر مدل‌سازی بار بصورت امپدانس ثابت باعث بهبود وضعیت پایداری ولتاژ می‌شود.

ط) مکان‌یابی SVC در حالت‌های مختلف مدل‌سازی نشان داد که در حالت مدل‌سازی تعدادی از بارها بصورت امپدانس ثابت، ضرایب مشارکت ولتاژ آن‌ها در ایجاد مد بحرانی سیستم نسبت به دو نوع مدل‌سازی دیگر کمتر است. در مقابل بارهایی که به صورت جریان ثابت مدل می‌شوند نسبت به مدل‌سازی‌های دیگر ضرایب مشارکت ولتاژ آن‌ها در مد بحرانی بیشتر است.

ی) مکان یابی SVC مبتنی بر تحلیل غیرخطی نشان داد که در حالتیکه مدلسازی بار بصورت جریان ثابت باشد اثرات غیرخطی محاسبه شده بوسیله روش فرم نرمال نسبت به مدلسازی امیدانس ثابت و توان ثابت کمتر است.

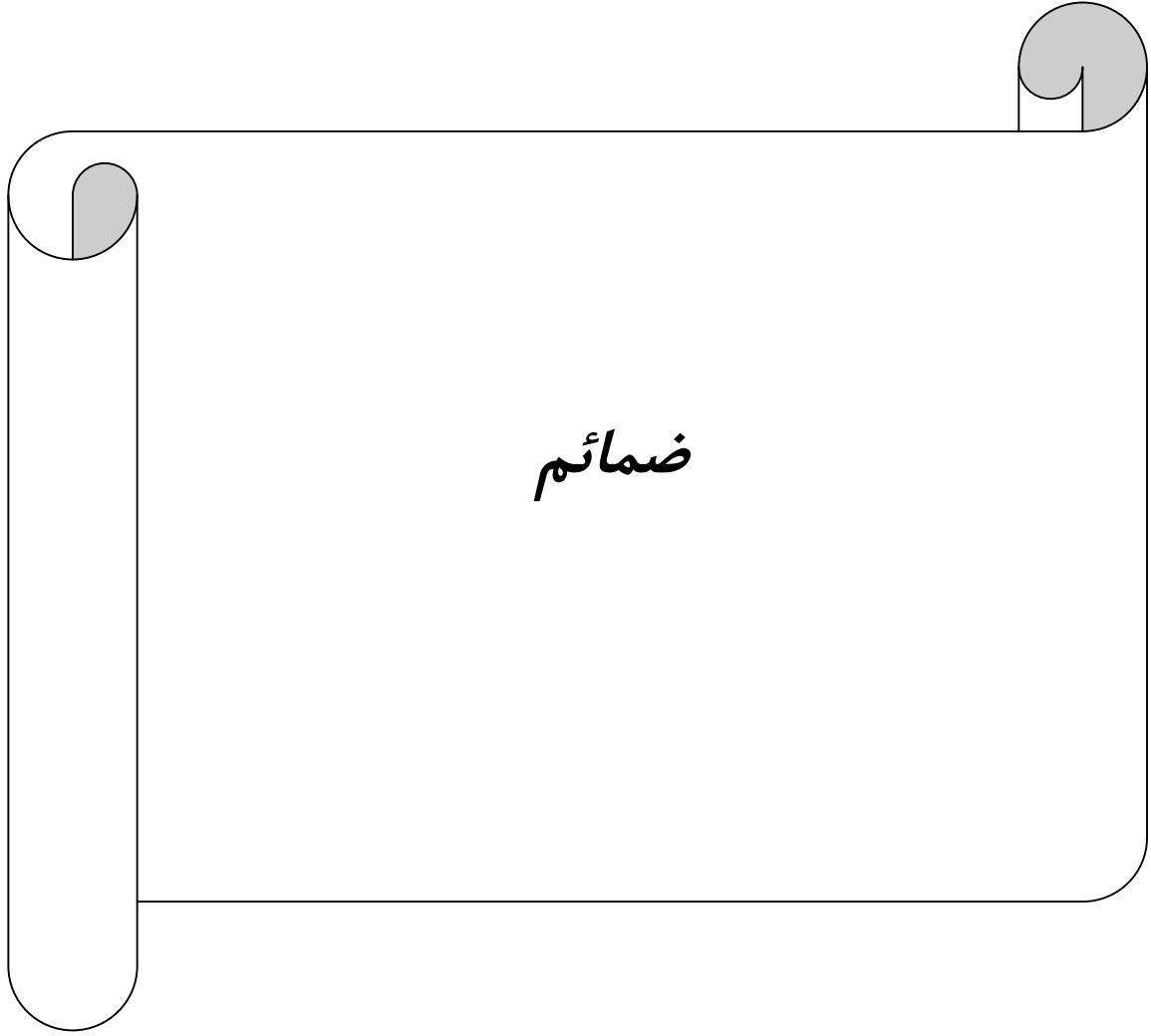
۶-۲- پیشنهادات

الف) در این پروژه برای تحلیل پایداری ولتاژماتریس ژاکوبین کامل سیستم مورد استفاده قرار گرفت. در مرجع [۴۲] عنوان شده است که ماتریس ژاکوبین کاهش یافته (اشاره شده در فصل سوم) تمامی اطلاعات لازم جهت تحلیل استاتیک پایداری ولتاژ را به همراه داشته باشد. انجام تحلیل پایداری مبتنی برضرایب مشارکت غیرخطی بر اساس ماتریس ژاکوبین کاهش یافته و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از ماتریس ژاکوبین کامل می تواند میزان درستی این ادعا را در سیستم های تحت استرس زیاد ارزیابی کند. این امر می تواند برای مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد.

ب) در روش فرم نرمال غیر همریخت ضرایب مشارکت غیرخطی از مجموع سه نوع ضرایب مشارکت تشکیل شده است. نوع اول همان ضرایب مشارکت خطی است که به طور متداول استفاده می شود. نوع دوم ضرایب مشارکت غیرخطی که در این پروژه در تحلیل غیر خطی مورد استفاده قرار گرفت بیانگر میزان مشارکت غیرخطی متغیر حالت در یک مد منفرد می باشد. نوع سوم ضرایب مشارکت بیانگر میزان مشارکت متغیرحالت در مد ترکیبی حاصل از دو مد منفرد می باشد از آنجاییکه در شرایط نزدیک به رزونانس یک مد ترکیبی می تواند مد بحرانی سیستم باشد بنابراین ارزیابی ضرایب مشارکت غیرخطی نوع سوم و تأثیر آن در مکان‌یابی SVC یکی از موارد پیشنهادی جهت مطالعات آتی می باشد.

ج) مدل SVC که در این معادلات مورد استفاده قرار گرفت مدل سوسپتانیسی بود و اثرات شبه دینامیکی شیب SVC را در معادلات وارد نمی‌کرد. بررسی اثر شیب SVC یکی از موضوعاتی است که می‌تواند مورد تحقیق قرار گیرد.

د) معیار در نظر گرفته شده بررسی میزان صحت نتایج بدست آمده از تحلیل غیرخطی علیرغم اینکه پایه تحلیلی محکمی دارد، در مورد اغتشاشات واقعی که متغیرهای مختلف دیگری نیز وجود دارند، باید به‌طور دقیق‌تری بررسی شود. از این رو انجام یک شبیه‌سازی دینامیکی برای مقایسه نتایج مکان‌یابی بدست آمده از تحلیل خطی و غیرخطی می‌تواند راهگشا باشد. به دلیل اینکه نحوه مدلسازی SVC و متغیرهای دینامیکی آن و شبکه و نوع اغتشاش همگی می‌تواند بر نتایج شبیه‌سازی تأثیرگذار باشد، انجام شبیه‌سازی و استخراج نتایج قابل تحلیل نیازمند ملاحظات بیشتری است.



الف) داده های سیستم ۳۹ باس New England [۴۵]

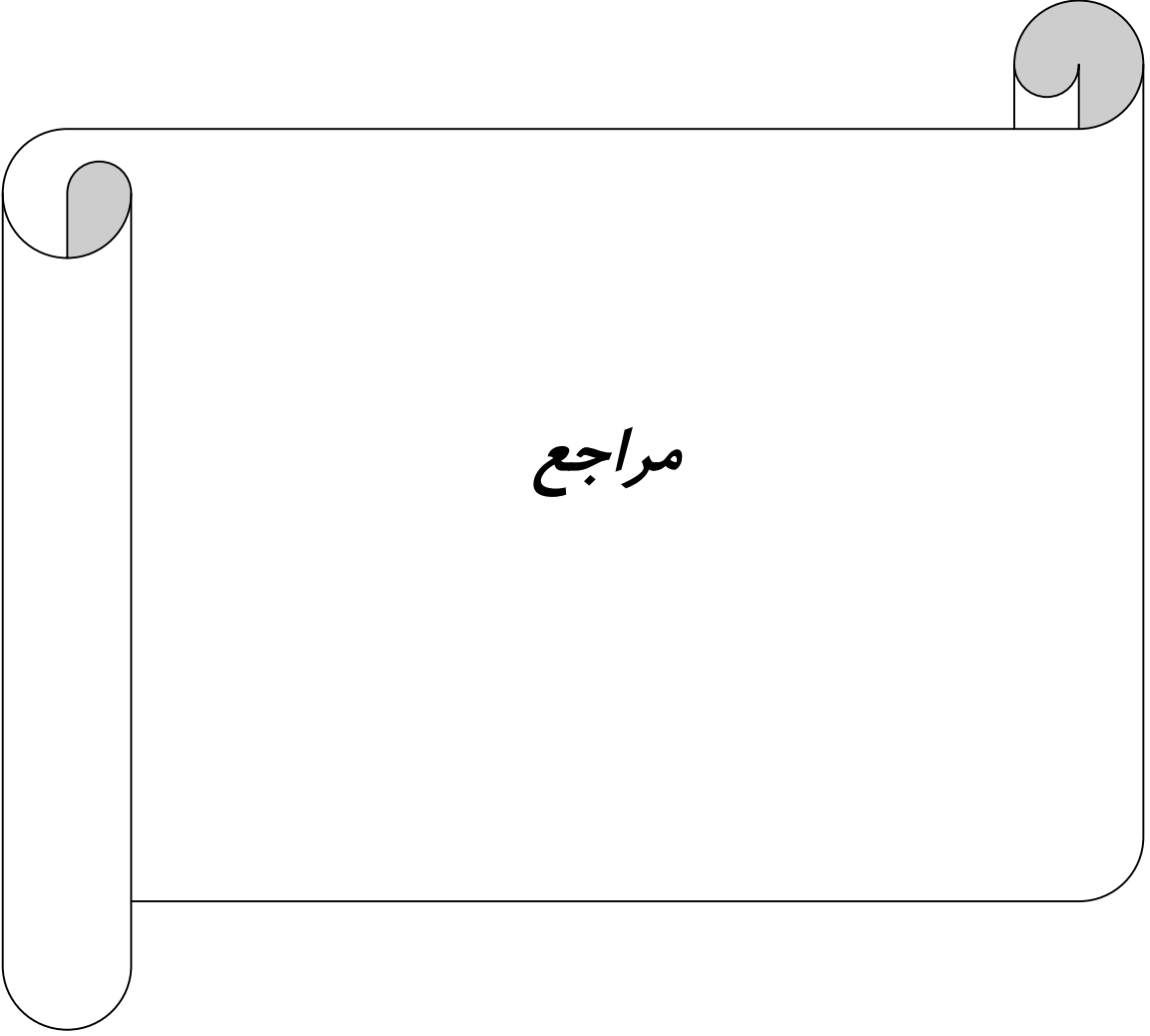
الف-۱) داده های مربوط به باس های سیستم

Generator			Load		Voltage [PU]	Type	Bus
Unit No.	MVar	MW	MVar	MW			
	0	0	0	0	-	PQ	1
	0	0	0	0	-	PQ	2
	0	0	2.4	322	-	PQ	3
	0	0	184	500	-	PQ	4
	0	0	0	0	-	PQ	5
	0	0	0	0	-	PQ	6
	0	0	84	233.8	-	PQ	7
	0	0	176	522	-	PQ	8
	0	0	0	0	-	PQ	9
	0	0	0	0	-	PQ	10
	0	0	0	0	-	PQ	11
	0	0	88	7.5	-	PQ	12
	0	0	0	0	-	PQ	13
	0	0	0	0	-	PQ	14
	0	0	153	320	-	PQ	15
	0	0	32.3	329	-	PQ	16
	0	0	0	0	-	PQ	17
	0	0	30	158	-	PQ	18
	0	0	0	0	-	PQ	19
	0	0	103	628	-	PQ	20
	0	0	115	274	-	PQ	21
	0	0	0	0	-	PQ	22
	0	0	84.6	247.5	-	PQ	23
	0	0	-92	308.6	-	PQ	24
	0	0	47.2	224	-	PQ	25
	0	0	17	139	-	PQ	26
	0	0	75.5	281	-	PQ	27
	0	0	27.6	206	-	PQ	28
	0	0	26.9	283.5	-	PQ	29
Gen10	-	250	0	0	1.0475	PV	30
Gen2	-	-	4.6	9.2	0.982	PV	31
Gen3	-	650	0	0	0.9831	PV	32
Gen4	-	632	0	0	0.9972	PV	33
Gen5	-	508	0	0	1.0123	PV	34
Gen6	-	650	0	0	1.0493	PV	35
Gen7	-	560	0	0	1.0635	PV	36
Gen8	-	540	0	0	1.0278	PV	37
Gen9	-	830	0	0	1.0265	PV	38
Gen1	-	1000	250	1104	1.03	PV	39

الف- (1) داده های مربوط به خطوط انتقال

Transformer Tap		Line Data				
Angle	Magnitude	B	X	R	To Bus	From Bus
0	0	0.6987	0.0411	0.0035	2	1
0	0	0.75	0.025	0.001	39	1
0	0	0.2572	0.0151	0.0013	3	2
0	0	0.146	0.0086	0.007	25	2
0	0	0.2214	0.0213	0.0013	4	3
0	0	0.2138	0.0133	0.0011	18	3
0	0	0.1342	0.0128	0.0008	5	4
0	0	0.1382	0.0129	0.0008	14	4
0	0	0.0434	0.0026	0.0002	6	5
0	0	0.1476	0.0112	0.0008	8	5
0	0	0.113	0.0092	0.0006	7	6
0	0	0.1389	0.0082	0.0007	11	6
0	0	0.078	0.0046	0.0004	8	7
0	0	0.3804	0.0363	0.0023	9	8
0	0	1.2	0.025	0.001	39	9
0	0	0.0729	0.0043	0.0004	11	10
0	0	0.0729	0.0043	0.0004	13	10
0	0	0.1723	0.0101	0.0009	14	13
0	0	0.366	0.0217	0.0018	15	14
0	0	0.171	0.0094	0.0009	16	15
0	0	0.1342	0.0089	0.0007	17	16
0	0	0.304	0.0195	0.0016	19	16
0	0	0.2548	0.0135	0.0008	21	16
0	0	0.068	0.0059	0.0003	24	16
0	0	0.1319	0.0082	0.0007	18	17
0	0	0.3216	0.0173	0.0013	27	17
0	0	0.2565	0.014	0.0008	22	21
0	0	0.1846	0.0096	0.0006	23	22
0	0	0.361	0.035	0.0022	24	23
0	0	0.513	0.0323	0.0032	26	25
0	0	0.2396	0.0147	0.0014	27	26
0	0	0.7802	0.0474	0.0043	28	26
0	0	1.029	0.0625	0.0057	29	26
0	0	0.249	0.0151	0.0014	29	28

Transformer Tap		Line Data				
Angle	Magnitude	B	X	R	To Bus	From Bus
0	1.006	0	0.0435	0.0016	11	12
0	1.006	0	0.0435	0.0016	13	12
0	1.07	0	0.025	0	31	6
0	1.07	0	0.02	0	32	10
0	1.07	0	0.0142	0.0007	33	19
0	1.009	0	0.018	0.0009	34	20
0	1.025	0	0.0143	0	35	22
0	1	0	0.0272	0.0005	36	23
0	1.025	0	0.0232	0.0006	37	25
0	1.025	0	0.0181	0	30	2
0	1.025	0	0.0156	0.0008	38	29
0	1.06	0	0.0138	0.0007	20	19



-
- [1] S. Liu, A. R. Messina, and V. Vittal, "Assessing Placement of Controllers and Nonlinear Behavior Using Normal form Analysis". IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 3, pp. 1486–1495, Aug. 2005.
 - [2] D. K. Arrowsmith and C. M. Place, "An Introduction to Dynamical Systems". Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1990.
 - [3] C.-M. Lin, V. Vittal, W. Kliemann, and A. A. Fouad, "Investigation of Modal Interaction and its Effects on Control Performance in Stressed Power Systems Using Normal forms of Vector Fields". IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 2, pp. 781–787, May 1996.
 - [4] S. Liu, A. R. Messina, and V. Vittal, "A Normal Form Analysis Approach to Siting Power System Stabilizers (PSSs) and Assessing Power System Nonlinear Behavior" IEEE Trans. Power Syst., Vol. 21, No. 4, November 2006.
 - [5] A. Hiroyuki, and I. Toshio, "A New PSS Parameter Design Using Nonlinear Stability Analysis" IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, June. 2007.
 - [6] J. Thapar, V. Vittal, W. Kliemann, and A. A Fouad, "Application of the Normal Form of Vector Fields to Predict Interarea Oscillation In Power Systems", IEEE Trans. Power Syst, 12, (2), pp. 844–850, 1997.
 - [7] Z.Y. Zou and Q.Y. Jiang, Y.J. Cao, "Normal Form Analysis of the Interaction among Multi Controller Channels of UPFC", Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou. P R China, 2004
 - [8] R. J. Betancourt, E. Barocio, "A Real Normal Form Approach to the Study of Resonant Power Systems" IEEE Trans. Power Syst., Vol. 21, No. 1, February 2006.
 - [9] Ph.D. Starret, Shelli Kay, "Application of Normal Forms of Vector Field to Stressed Power Systems" Iowa State University, 1994.
 - [10] S. Liu, A. R. Messina, and V. Vittal, "Assessing Placement of Controllers and Nonlinear Behavior Using Normal Form Analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 3, pp. 1486–1495, Aug. 2005.
 - [11] S. K. Starrett, W. Kliemann, V. Vittal, and A. A. Fouad, "Power System Modal Behavior: Significance of Second and Third Order Nonlinear Terms" in Proc. North American Power Symp., Washington, DC, pp.241–255, 1993.
 - [12] I. Dobson and E. Barocio, "Scaling of Normal Form Analysis Coefficients Under Coordinate Change," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, Aug. 2004.
 - [13] S. Zhu, V. Vittal, and W. Kliemann, "Analyzing Dynamic Performance of Power Systems Over Parameter Space Using Normal Forms of Vector Fields Part I: Identification of Vulnerable Regions " IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 3, pp. 444–450, Aug. 2001.

-
- [14] IEEE-CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions (Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., and Vittal, V., Definition and classification of power system stability, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 19, 1387–1401, 2004.
- [15] Leonard L. Grigsby, "Power System Stability and Control", CRC Press, 2007.
- [16] B. Gao, G.K. Morison, P. Kundur, "Voltage Stability Analysis Using Modal Analysis" IEEE Transactions on Power System, Vol 7, No. 4, November 1992.
- [17] R.J. Thomas and A. Tiranuchit. "Voltage Instabilities in Electric Power Networks". Proc. Eighteenth Southeast Symposium on System Theory, pp. 359-363. 1986.
- [18] R.A. Schlueter. et. al., "Voltage Stability and Security Assessment". EPRI Final Report EI-5967 on Project 1999-8. May 1988.
- [19] Y. Mansour. and P.G. Hanington. "Voltage Instability -B.C. Hydro's Practice and Xperience". Panel Session on Voltage Instability. IEEE/PES Summer Meeting, San Francisco. CA. 1987.
- [20] V. Ajarapu, "Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control", Springer Science&Business Media, LLC, 2006.
- [21] T. Smed, J. Carr, "Feasible eigenvalue sensitivity for large power systems", IEEE Transaction on Power System, 8: 555-563, 1981.
- [22] P.kundur, "Power System Stability and Control" Mcgraw-hill inc,1994.
- [23] K. R. Padiyar, "Facts Controllers in Power Transmission and Distribution" New Age International (P) Ltd., Publishers. 2007.
- [24] X. P. Zhang, C.Rehtanz,B.Pal, "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006.
- [25] E. Acha, R.Esquivel, H.A.Pe´rez, C. A.Camacho, "FACTS Modelling and Simulation in Power Networks" john Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 2004.
- [26] IEEE SSCWG (Special Stability Controls Working Group),"Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Transaction on Power Systems, 9(1) 229–240, 1995.
- [27] H. Ambriz-Pe´rez, E. Acha and C.R. Fuerte-Esquivel, "Advanced SVC Models for Newton– Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies", IEEE Transaction on Power Systems, 15(1) 129–136, 2000.

-
- [28] RM. Mathur, RK. Varma, "Thyristor Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems", IEEE Computer Society Press, 2002.
- [29] S. Gerbex, R. Cherkaoui, and A. J. Germond, "Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 3, August 2001.
- [30] R. A. Schlueter, I. Hu, M. W. Chang, and A. Costi, "Methods For Determining Proximity To Voltage Collapse", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, pp. 285–291, Feb. 1991.
- [31] N. K. Sharma, A. Ghosh, "A Novel Placement Strategy for Facts Controllers", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 3, July 2003.
- [32] S. Gerbex, R. Cherkaoui, and A. J. Germond, "Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices In a Power System By Means of Genetic Algorithms", IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 3, pp. 537–544, Aug 2001.
- [32] Roberto Mínguez, Federico Milano, "Optimal Network Placement of SVC Devices", IEEE Trans. Power, Vol. 22, No. 4, November 2007.
- [32] Lijun Cai, and István Erlich, "Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices using Genetic Algorithms, " ISAP, Intelligent Systems Application to Power Systems, 2003, Lemnos, Greece, August 31–September 3, 2003.
- [34] Malihe M. Farsangi, Hossein Nezamabadi-pour, Yong-Hua Song, "Placement of SVCs and Selection of Stabilizing Signals in Power Systems", IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 3, Aug. 2007.
- [35] Abdelaziz Laifa, "FACTS Allocation For Power Systems Voltage Stability Enhancement Using MOPSO", 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, Aug. 2008.
- [36] Y. Mansour et al., "SVC placement Using Critical Modes of Voltage instability," IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 2, pp. 757–763, May 1994.
- [37] I. Martínez, A. R. Messina, and E. Barocio, "Perturbation Analysis of Power Systems: Effects of Second- and Third-order Nonlinear Terms on System Dynamic Behavior," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 71, no. 2, pp. 159–167, 2004.
- [38] S. Liu, A. R. Messina, and V. Vittal, "Assessing Placement of Controllers and Nonlinear Behavior Using Normal Form Analysis" IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 3, pp. 1486–1495, Aug. 2005.
- [39] Y. Ni, V. Vittal, and W. Kliemann, "System Separation Mechanism in Neighborhood of Relevant Type-n UEP Using the Normal Form of Vector Field," IEEE Trans. Power Syst., vol. 13, no. 2, pp. 139–144, May 1998.

-
- [40] C.-M. Lin, V. Vittal, and W. Kliemann, "Investigation of Modal Interaction and its Effects on Control Performance in Stressed Power Systems Using Normal Forms of Vector Fields," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 781–787, 1996.
- [41] B. Gao, G. K. Morison, and P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 4, pp. 1529–1542, Nov. 1992.
- [42] I. J. Pe'rez-Arriaga, G. C. Verghese, and F. C. Schweppe, "Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems Part I: Heuristic Introduction," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-101, no. 9, pp. 3117–3125, Sep. 1982.
- [43] L. C. P. da Silva, da Costa, and W. Xu, "Preliminary Results on Improving the Modal Analysis Technique for Voltage Stability Assessment" in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Seattle, WA, Vol. 3*, pp. 1946–1950, 2000.
- [44] J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, *Power System Dynamics and Stability*, John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [45] [URL\www.psdyn.ece.wisc.edu/IEEE_benchmarks/index.htm](http://www.psdyn.ece.wisc.edu/IEEE_benchmarks/index.htm)/June 2009.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotics Engineering

**SVC Allocation for Voltage Stability Enhancement Using Normal
Form Theory**

By:

Mohammad Eskandari Nasab

Under Supervision of:

Dr. Mahdi Banejad

Consultant:

Dr. Naser Pariz

**February
2011**

