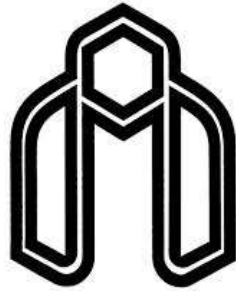


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق
گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه های مستقل از شبکه

بهزاد خاکباز

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانزاد

استاد مشاور:

دکتر امین حاجی زاده

شهریور ۱۳۹۴

تقدیر و تشکر:

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش به ما عطا نمود. اینجانب بر خود لازم می‌دانم در این چند خط محدود از تلاش‌ها و زحمات استاتید راهنما و مشاور گرامی، آقایان دکتر بانژاد و دکتر امین حاجی زاده، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم که در مسیر ارائه‌ی این پایان‌نامه کمال همکاری را با اینجانب داشته‌اند.

تعهد نامه

اینجانب بهزاد خاکباز دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق / قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی پایداری سیگنال کوچک در ریز شبکه های مستقل از شبکه تحت راهنمایی دکتر مهدی بانژاد و مشاوره‌ی دکتر امین حاجی زاده متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

چکیده فارسی

در سال های اخیر با کاهش منابع تجدیدناپذیر، بشر به سمت استفاده از انرژی های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی و باد و ... سوق پیدا کرده است. سیستم های تجدید پذیر را می توان به صورت متصل به شبکه یا مستقل از شبکه (حالت جزیره ای) بهره برداری کرد. یکی از مسایل مهم در این گونه سیستم ها تحلیل پایداری سیگنال کوچک آن ها می باشد.

در این پایان نامه به بررسی پایداری سیگنال کوچک سیستم های تجدید پذیر در حالت جزیره ای^۱ پرداخته شده است. برای بررسی رفتار ریز شبکه بر اساس معادلات دیفرانسیل در فضای حالت، ابتدا مدل سیگنال کوچک قسمت های مختلف ریز شبکه در فضای حالت نوشته شده اند و سپس با ترکیب این معادلات به یک مدل نهایی برای بررسی سیستم مورد مطالعه دست یافته شده است. برای بررسی حساسیت مقادیر ویژه^۲ سیستم نسبت به اجزای مختلف سیستم، آنالیز حساسیت نسبت به ضرایب کنترل دروپ^۳ انجام شده است. تحلیل مقادیر ویژه سیستم با استفاده از مدل فضای به دست آمده برای ریز شبکه صورت گرفته است و بر اساس آن تغییرات مقادیر ویژه و تحلیل پایداری سیگنال کوچک انجام شده است. در نهایت با استفاده از مدل به دست آمده شبیه سازی در محیط سیمولینک^۴ متلب انجام شده است و در حوزه زمان به مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی به بررسی تاثیر ضرایب کنترلی و پارامترهای دیگر ریز شبکه بر پایداری سیگنال کوچک سیستم و همچنین به تاثیر بار توان ثابت بر پایداری سیگنال کوچک سیستم پرداخته شده است.

کلیدواژه ها: پایداری سیگنال کوچک، ریز شبکه جزیره ای، اینورترهای موازی، کنترل دروپ، اینورترهای منبع ولتاژی، آنالیز حساسیت، مدل بار

^۱ Island

^۲ Eigenvalues Sensivity

^۳ Droop

فهرست عناوین

فصل اول - مقدمه ۱

۱-۱ انگیزه های تحقیق ۲

۲-۱ تعریف مسئله و اهداف تحقیق ۲

۳-۱ اهداف تحقیق ۳

۴-۱ ساختار پایان نامه ۴

فصل دوم - مروری بر مطالعات پیشین در زمینه پایداری سیگنال کوچک ۵

۱-۲ مقدمه ۶

۲-۲ مفاهیم پایداری سیگنال کوچک ۸

۱-۲-۲ مبانی بررسی پایداری سیگنال کوچک ۱۰

۳-۲ آنالیز حساسیت مقادیر ویژه ۱۳

۴-۲ منابع تجدید پذیر انرژی ۱۴

۱-۴-۲ مولد فتوولتایک ۱۴

۲-۴-۲ پیل سوختی ۱۶

۳-۴-۲ توربین بادی ۱۶

۴-۴-۲ میکروتوربین ۱۷

۵-۴-۲ سایر تولیدات پراکنده ۱۷

۵-۲ ساختار اینورتر ۱۸

۱-۵-۲ اینورتر های منبع ولتاژ ۱۸

۱۹	۲-۵-۲ اینورتر منبع جریان
۱۹	۳-۵-۲ اینورتر سه فاز
۲۰	۶-۲ وضعیت های عملکرد ریز شبکه
۲۱	۱-۶-۲ وضعیت عملکردی متصل به شبکه
۲۱	۲-۶-۲ وضعیت عملکردی مستقل از شبکه
۲۱	۷-۲ روش کنترل ریز شبکه در حالت مستقل از شبکه
۲۱	۱-۷-۲ کنترل دروپ
۲۲	۲-۷-۲ روش مدولاسیون پهنای باند
۲۳	۸-۲ انواع بار در ریز شبکه
۲۳	۹-۲ بررسی کارهای اخیر در زمینه سیگنال کوچک ریز شبکه ها
۲۶	۱۰-۲ جمع بندی
۲۷	فصل سوم - مدل فضای حالت ریز شبکه مستقل از شبکه
۲۸	۱-۳ مقدمه
۲۸	۲-۳ مدل سازی فضای حالت
۳۰	۳-۳ مدل سازی ریز شبکه مستقل از شبکه
۳۲	۱-۳-۳ روش کنترل ریز شبکه
۳۵	۴-۳ معادلات فضای حالت سیستم
۳۶	۱-۴-۳ تبدیلات مختصات
۳۷	۲-۴-۳ مدل سیگنال کوچک اینورتر های موازی
۴۹	۳-۴-۳ مدل سازی سیگنال کوچک بار
۵۰	۳-۴-۴ مدل سیگنال کوچک نهایی ریز شبکه

۵-۳	مدل بار با توان ثابت.....	۵۱
۶-۳	روش آنالیز حساسیت مقادیر ویژه سیستم برای تحلیل سیگنال کوچک ریز شبکه ها ..	۵۴
۷-۳	مراحل انجام کار	۵۶
۸-۳	جمع بندی.....	۵۸
فصل چهارم- شبیه سازی و نتایج.....		
۱-۴	مقدمه	۶۰
۲-۴	سیستم مورد مطالعه	۶۰
۱-۲-۴	مکان اولیه مقادیر ویژه سیستم	۶۳
۳-۴	آنالیز حساسیت مقادیر ویژه سیستم	۶۶
۱-۳-۴	بررسی تغییرات ضریب دروپ توان اکتیو بر پایداری سیگنال کوچک	۶۸
۲-۳-۴	بررسی تغییرات ضریب دروپ توان راکتیو بر پایداری سیگنال کوچک	۶۹
۳-۳-۴	تاثیر بار توان ثابت در ریز شبکه	۷۲
۴-۴	شبیه سازی رفتار سیستم درحوزه زمان	۷۳
۱-۴-۴	فرکانس و ولتاژ خروجی سیستم.....	۷۴
۵-۴	جمع بندی.....	۸۶
فصل پنجم- نتیجه گیری و پیشنهادات		
۱-۵	نتیجه گیری	۸۸
۲-۵	پیشنهادات.....	۸۹
منابع		
۹۱.....		

فهرست شکل ها

- شکل (۱-۲) - تغییرات شبکه برق ۷
- شکل (۲-۲) - انواع پایداری ۸
- شکل (۳-۲) - تاثیر مقادی ویژه در ناپایداری سیگنال کوچک سیستم ۱۰
- شکل (۴-۲) - دیاگرام کلی یک اینورتر ۱۸
- شکل (۵-۲) - اینورتر منبع ولتاژ ۱۹
- شکل (۶-۲) - اینورتر منبع جریان ۱۹
- شکل (۷-۲) - اینورتر سه فاز منبع ولتاژی نیم پل ۲۰
- شکل (۸-۲) - اینورتر سه فاز منبع ولتاژی تمام پل ۲۰
- شکل (۹-۲) - عملکرد مدولاسیون پهنای باند (PWM) ۲۳
- شکل (۱-۳) - مدار معادل ترانسفورماتور تک فاز دو سیم پیچه (صرف نظر از تلفات آهن) .. ۲۹
- شکل (۲-۳) - ساختار ریز شبکه مورد مطالعه ۳۱
- شکل (۳-۳) - مدل معادل ساده شده تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر ۳۴
- شکل (۴-۳) - نمودار دروپ ولتاژ بر حسب توان راکتیو ۳۵
- شکل (۵-۳) - نمودار دروپ فرکانس بر حسب توان اکتیو ۳۵
- شکل ۳-۶ - سیستم تبدیل مختصات ۳۶
- شکل (۷-۳) - دیاگرام کنترل ولتاژ ۴۲
- شکل (۸-۳) - دیاگرام کنترل جریان ۴۳
- شکل (۹-۳) - مدل فیلتر خروجی اینورتر ۴۴
- شکل (۱۰-۳) - رفتار بار توان ثابت ۵۲
- شکل (۱۲-۳) - مراحل انجام کار ۵۷

- شکل ۴-۱- مکان اولیه مقادیر ویژه ریز شبکه ۶۳
- شکل (۴-۲)- بررسی تاثیر تغییرات ضریب دروپ توان اکتیو بر پایداری سیگنال کوچک
سیستم ۶۹
- شکل (۴-۳)= بررسی تاثیر تغییرات ضریب دروپ توان راکتیو بر پایداری سیگنال کوچک
سیستم ۷۰
- شکل (۴-۴)- بررسی تاثیر تغییرات مقاومت خطوط بر پایداری سیگنال کوچک سیستم .. ۷۱
- شکل (۴-۵)- بررسی تاثیر تغییرات اندوکتانس خط بر پایداری سیگنال کوچک ۷۲
- شکل (۴-۶)- بررسی تاثیر با توان ثابت بر پایداری سیگنال کوچک ۷۳
- شکل (۴-۷)-فرکانس اینورتر ها به ازای $K_p=K_q=0/0001$ ۷۴
- شکل (۴-۸)-توان راکتیو تولیدی اینورتر ها به ازای $K_p=K_q=0/0001$ ۷۵
- شکل (۴-۹)- توان اکتیو تولیدی اینورتر ها به ازای $K_p=K_q=0/0001$ ۷۵
- شکل (۴-۱۰)-شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر ها به ازای $K_p=K_q=0/0001$ ۷۶
- شکل (۴-۱۱)-شکل موج جریان خروجی اینورتر ها به ازای $K_p=K_q=0/0001$ ۷۶
- شکل (۴-۱۲)- فرکانس اینورتر ها به ازای $K_p=0/01$ $K_q=0/0001$ ۷۷
- شکل (۴-۱۳)-ولتاژ اینورتر ها به ازای $K_p=0/01$ $K_q=0/0001$ ۷۸
- شکل ۴-۱۴- جریان اینورتر ها به ازای $K_p=0/01$ $K_q=0/0001$ ۷۸
- شکل (۴-۱۵)- فرکانس اینورتر ها به ازای $K_p=0/0001$ $K_q=0/01$ ۷۹
- شکل (۴-۱۶)-تغییرات توان راکتیو به ازای $K_p=0/0001$ $K_q=0/01$ ۸۰
- شکل (۴-۱۷)- تغییرات توان اکتیو به ازای $K_p=0/0001$ $K_q=0/01$ ۸۰
- شکل (۴-۱۸)- بررسی تغییرات بار بر روی توان اکتیو خروجی اینورتر ها ۸۱
- شکل (۴-۱۹) بررسی تغییرات بار بر روی توان راکتیو خروجی اینورتر ها ۸۲
- شکل (۴-۲۰)-بررسی تغییرات بار بر شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر ها ۸۲

- شکل (۴-۲۱) - بررسی تغییرات بار بر شکل موج جریان خروجی اینورترها ۸۳
- شکل (۴-۲۲) - بررسی تغییرات بار بر روی فرکانس ریز شبکه ۸۳
- شکل (۴-۲۳) - تغییرات جریان خروجی اینورترها در حضور بار توان ثابت ۸۴
- شکل (۴-۲۴) - تغییرات توان اکتیو خروجی اینورترها در حضور بار توان ثابت ۸۵
- شکل (۴-۲۵) - تغییرات توان راکتیو خروجی اینورترها در حضور بار توان ثابت ۸۵

فهرست جداول

- جدول (۱-۴) - مقادیر پارامترهای ریز شبکه ۶۱
- جدول (۲-۴) - مقادیر ولتاژ و جریان نقطه کار ریز شبکه ۶۲
- جدول (۳-۴) - مقدار و مشخصات مقادیر ویژه اولیه ریز شبکه ۶۴
- جدول (۴-۴) - حساسیت مقادیر ویژه نسبت به ضرایب دروپ ۶۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱ انگیزه های تحقیق

در سرتاسر جهان سیستم‌های رایج در شبکه‌های برق در حال تغییر و تحول می باشند و جای خود را به سیستم‌های نسل جدید می دهند. هر تغییر و تحولی در ساختار شبکه‌های برق در امتداد خود موضوعات زیادی را برای بررسی و تحقیق به جای می گذارد که نیاز به بررسی و پژوهش در آن‌ها احساس می شود. در کشور ما شبکه های تولید توان با ساختار جدید با عنوان تولیدات پراکنده یا ریز شبکه‌ها شناخته می شوند در سال های اخیر با استقبال خوبی مواجه شده اند و تعداد زیادی از محققین را به سمت خود کشانده اند، از این رو در این پژوهش نیز تلاش شده است تا قسمتی هر چند ناچیز از مبحث تولیدات پراکنده را مورد مطالعه و بررسی قرار داده شود.

۲-۱ تعریف مسئله و اهداف تحقیق

در گذشته شبکه های تولید برق شامل نیروگاه های بزرگ و متمرکز بودند که تعداد آن ها نسبتا کم بوده است. به تدریج با گذشت زمان و تغییر در شرایط اقتصادی و منابع طبیعی، شبکه های تولید برق دچار تغییر و تحول شدند. در ساختار جدید تعداد مولدهای تولید انرژی که از منابع انرژی تجدید پذیر (مانند انرژی فتوولتاییک و انرژی بادی) استفاده می کنند، تعدادشان زیاد شده اند و همچنین توان تولیدی مولدها کاهش یافته است. علاوه بر مولدهای تجدید پذیر، می توان از مولدهای تجدید ناپذیر اما در ابعاد کوچک نیز در ساختار جدید بهره برد. این تولیدات انرژی الکتریسته که غالبا با مقادیر کوچک و نامتمرکز هستند در اصطلاح تولیدات پراکنده نامیده می شوند و به شبکه هایی که شامل تولیدات پراکنده می شوند، ریز شبکه^۱ گفته می شود. ریز شبکه‌ها به صورت کلی دو وضعیت عملکردی دارند، در بعضی حالات ریز شبکه‌ها به صورت متصل به شبکه اصلی می باشند و برخی زمان ها مانند زمانی که سیستم اصلی با خطا مواجه شده باشد ریز شبکه به صورت مستقل از شبکه اصلی کار می کند. به ریز شبکه ای که مستقل از شبکه کار کند، ریز شبکه درحالت ((جزیره

^۱ Microgrid

ای))^۱ نیز گفته می شود. این تغییر ساختار در شبکه های قدرت در رفتار دینامیکی آنها تاثیر گزار است و برای بررسی رفتار دینامیکی آنها باید از روشی مناسب با توجه به ساختار آنها استفاده کرد. در این پژوهش هدف اصلی بررسی پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه می باشد. پایداری دینامیکی در ریز شبکه ها در حالت مستقل از شبکه اهمیت دو چندانی می یابد، زیرا در حالت مستقل از شبکه دینامیک شبکه به وسیله ریز مولدها به ریز شبکه اعمال می شود، در صورتی که در حالت متصل به شبکه به دلیل کوچک بودن ریز شبکه ها در مقابل شبکه اصلی تاثیر چندانی در پایداری دینامیکی شبکه ندارد. بررسی پایداری سیگنال کوچک در شبکه های رایج با استفاده از مدل های استاندارد فضای حالت اجزای مختلف شبکه مانند ماشین های سنکرون، گاورنر و ... انجام می شود. برای دست یابی به این مهم ابتدا به مدل سازی شبکه پرداخته می شود و سپس با بدست آوردن مدل کلی فضای حالت شبکه در نقطه کاری به بررسی پایداری سیگنال کوچک شبکه می پردازند. در ریز شبکه ها نیز تلاش شده است تا روشی مشابه با روش استفاده شده در شبکه های رایج به یک مدل فضای حالت دست پیدا کنند و به بررسی سیگنال کوچک ریز شبکه بپردازند. یکی از متداول ترین ساختار در ریز شبکه ها، ریز شبکه دارای ریز مولد هایی است که به وسیله اینورتر های موازی به شبکه متصل شده اند. اینورتر ها در واقع با استفاده از کلید های الکترونیک قدرت و سیستم کنترلی مربوطه ولتاژ DC را به ولتاژ AC با فرکانس دلخواه تبدیل می کند. روش کنترلی در اینورترها انواع مختلفی دارد که با توجه به شرایط و امکانات قابل انتخاب می باشد و تاثیر چشمگیری در پایداری دینامیکی ریز شبکه ایفا می کند.

۱-۳ اهداف تحقیق

در این پایان نامه تلاش شده است تا پایداری دینامیکی از نوع سیگنال کوچک را در ریز شبکه های مستقل از شبکه مورد بررسی قرار داده شود، بر این اساس اهداف این تحقیق به صورت

^۱Island

خلاصه عبارتند از :

۱. به دست آوردن مدل کلی ریزش شبکه مستقل از شبکه برای مطالعات پایداری سیگنال

کوچک

۲. بررسی تاثیر تغییرات پارامترهای کنترلی مختلف ریز شبکه در حالت مستقل از

شبکه بر پایداری آن

۳. بررسی تاثیر تغییر بار بر پایداری سیگنال کوچک ریزش شبکه مستقل از شبکه

۴-۱ ساختار پایان نامه

در این پایان نامه بعد از مقدمه، در فصل دوم ابتدا به معرفی مفاهیم و ملزومات و تعاریف مورد نیاز برای فهم مساله توسط مخاطب و همچنین مروری بر کارهای دیگر محققان در زمینه پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه پرداخته شده است. سپس در فصل سوم به تعریف مساله پرداخته می شود. مدل های مورد نیاز جهت شبیه سازی، از جمله مدل اینورتر و روش کنترلی، مدل فضای حالت ریز شبکه، مدل بار و هم چنین روش ارایه شده جهت آنالیز حساسیت در فصل سوم ارایه شده است. ویژگی این پایان نامه را می توان بررسی و تاثیر مدل بار توان ثابت بر پایداری ریز شبکه با استفاده از مدل ارایه شده، بیان کرد. بر اساس معادلات به دست آمده، در فصل چهارم شبیه سازی ها انجام گرفته و نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفته شده است. در نهایت در فصل پنجم نتایج این تحقیق به همراه پیشنهادات برای ادامه کار ارایه شده اند.

فصل دوم

مروری بر مطالعات پیشین در
زمینه پایداری سیگنال کوچک در
ریز شبکه‌ها

۱-۲ مقدمه

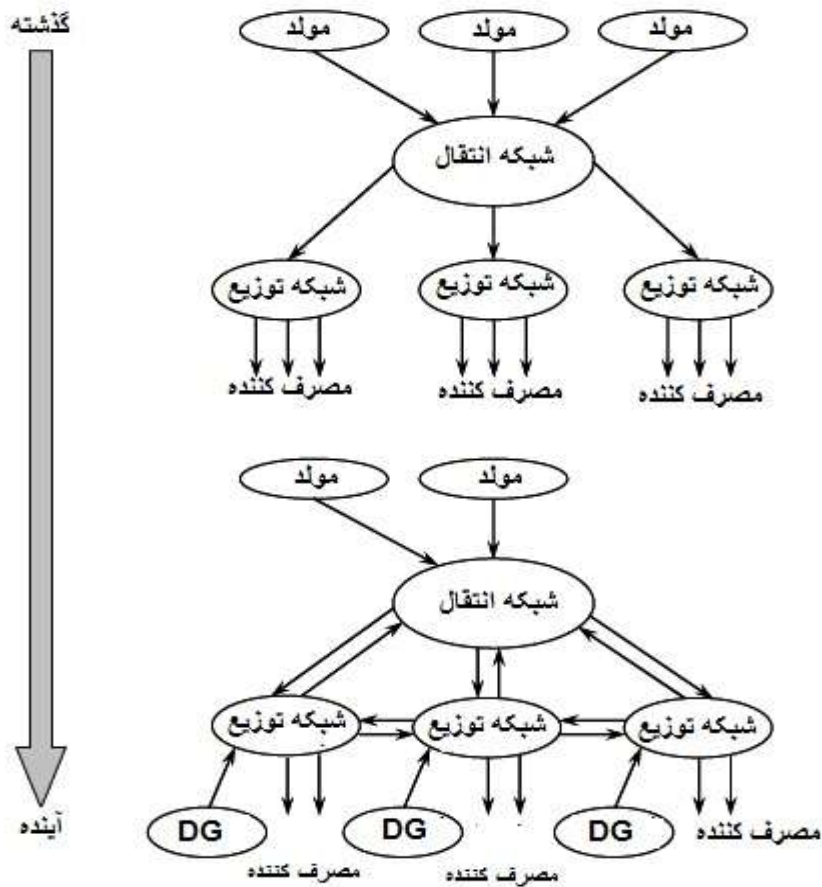
در دنیای مدرن امروز نیاز به منابع مطمئن انرژی بسیار محسوس می باشد و از طرفی افزایش نگرانی درباره ساختار کنونی شبکه انتقال و توزیع یک چالش عظیم در راستای امنیت، کیفیت و قابلیت اطمینان منابع انرژی می باشد. برای تجدید ساختار و پیشبرد این مهم نیاز به سرمایه گذاری زیادی می باشد، در حالی که پر بازده ترین راه برای پاسخ به مصرف جامعه، ادغام ایده های نو، تکنولوژی و ساختار شبکه می باشد.

یکی از نتایج تعدیل در بازارهای برق پیشرفت سریع و تولیدات غیر متمرکز و انرژی های تجدید پذیر می باشد، که انقلابی عظیم در طراحی و عملکرد شبکه های توزیع ایجاد کرده است. منابع تجدیدپذیر انواع زیادی دارند که از جمله آن ها می توان به میکروتوربین، پیل سوختی و سلول های خورشیدی اشاره کرد. این منابع تجدید پذیر می توانند در کنار مراکز بار تعبیه شوند و نیاز به انرژی را در آن محل پاسخگو باشند. این منابع انرژی تجدید پذیر با نام تولیدات پراکنده نیز شناخته می شوند [۱].

ریز شبکه ها می توانند به صورت مستقل از شبکه کار کنند که در این عملکرد سهولت را برای مصرف کنندگان صنعتی از راه هایی مانند کاهش هزینه های خطوط انتقال، توان راکتیو و جبران سازی هارمونیک و بهبود ضریب توان به ارمغان بیاورد. هم چنین در سیستم های تولید پراکنده می توان در هنگام خطا به راحتی و بدون هیچ مشکلی از شبکه اصلی جدا شد و با عملکرد مستقل از شبکه به ادامه فعالیت پرداخت [۱].

در شکل (۱-۲) می توان تغییرات شبکه برق را از گذشته تا به امروز را مشاهده کرد. در این شکل مکان قرار گرفتن تولیدات پراکنده^۱ در شبکه برق را می توان مشاهده کرد.

^۱ Distributed generation(DG)



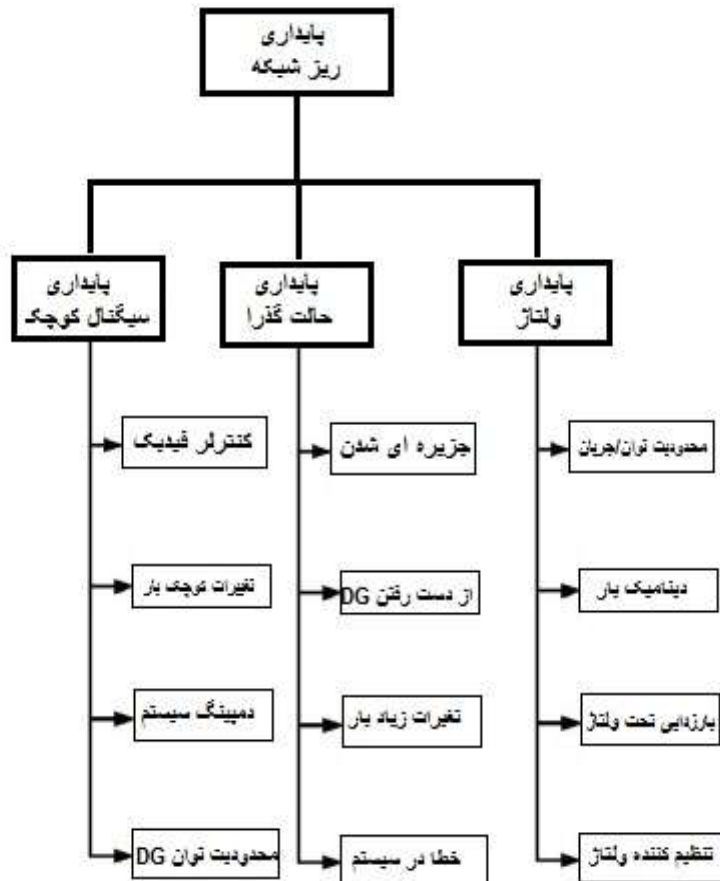
شکل (۱-۲) - تغییرات شبکه برق [۲]

با توجه به اینکه ساختار ریز شبکه‌ها با شبکه‌های متداول متفاوت است بنابراین بدیهی است که به روش‌های کنترلی متفاوت و مورد نیاز خویش نیاز دارد و علاوه بر این باید در بحث بررسی پایداری نیز روش‌هایی مورد استفاده قرار بگیرد که با ساختار ریز شبکه‌ها منطبق باشند. با توجه به اهمیت پایداری در ریز شبکه‌ها ابتدا انواع پایداری در ریز شبکه‌ها را معرفی می‌کنیم. پایداری ریز شبکه‌ها وابسته به نوع ریز شبکه، توپولوژی کنترل، پارامترهای شبکه، ریز مولد های به کار رفته و ... می‌باشد. انواع پایداری در ریز شبکه‌ها به سه دسته کلی تقسیم می‌شود که عبارتند از [۳] :

۱. پایداری سیگنال کوچک
۲. پایداری حالت گذرا

۳. پایداری ولتاژ

در شکل (۲-۲) عوامل موثر بر هر یک از انواع پایداری را مشاهده می کنید:



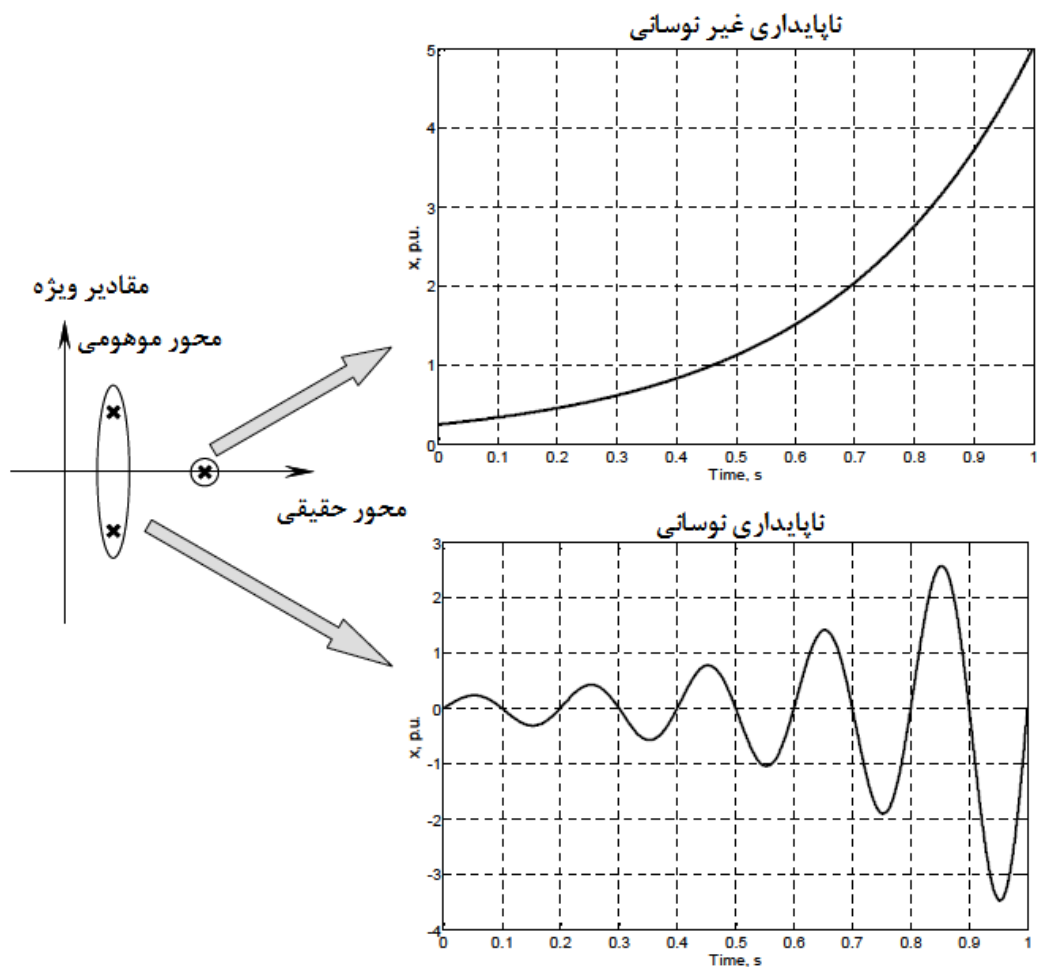
شکل (۲-۲) - انواع پایداری [۳]

۲-۲ مفاهیم پایداری سیگنال کوچک

پایداری سیگنال کوچک به توانایی سیستم در پشتیبانی پایداری در هنگامی که در معرض اغتشاشات کوچک قرار می گیرد گفته می شود. یک اغتشاش زمانی کوچک تلقی می شود که سیستم خطی شده در حول نقطه تعادل در مواجهه با آن بتواند دینامیک سیستم اصلی غیرخطی را به طور مناسب نمایش دهد [۴].

پایداری سیگنال کوچک را می توان به دو دسته تقسیم کرد که نوع اول آن وابسته به محدوده المان ها در پایداری حالت دایمی می باشد. یک سیستم قدرت می تواند به چندین روش کنترل شود که یکی از این روش ها افزایش زاویه ولتاژ به منظور کنترل توان اکتیو و روش دیگر کاهش توان راکتیو تزریق شده توسط مولد جهت کنترل اندازه ولتاژ در هنگام اتصال به بار می باشد. اگر یکی از این شرایط از کنترل خارج شود، سیستم از لحاظ سیگنال کوچک می تواند ناپایدار شود. نوع دیگر پایداری سیگنال کوچک مرتبط با ناپایداری نوسانی و میرایی نامناسب موده های نوسانی می باشد. به عنوان مثال می توان به زیاد بودن ضریب کنترل تحریک ژنراتور های سنکرون اشاره کرد، که می تواند باعث بهتر شدن حالت گذرا شود اما در ادامه ممکن است به مشکل ناپایداری سیگنال کوچک مواجه شد.

تمامی حالات ناپایداری سیگنال کوچک به طور مستقیم به مقادیر ویژه سیستم مربوط می باشند. اگر تمامی مقادیر ویژه سیستم دارای قسمت حقیقی منفی باشند سیستم از لحاظ سیگنال کوچک پایدار خواهد بود. اگر در یک سیستم یکی از مقادیر ویژه مقادیر مثبت و حقیقی شوند در این حالت با یک نوع ناپایداری غیر نوسانی برخورد خواهیم کرد. در نوع دیگر ناپایداری نیز در یک سیستم ممکن است یک جفت مقدار ویژه با قسمت حقیقی مثبت وجود داشته باشد که در این حالت ناپایداری نوسانی در سیستم رخ خواهد داد. این دو حالت ناپایداری در شکل (۲-۳) به خوبی مشاهده می شوند.



شکل (۲-۳) - تاثیر مقادیر ویژه در ناپایداری سیگنال کوچک سیستم

۲-۲-۱ مبانی بررسی پایداری سیگنال کوچک

با در نظر گرفتن نمایش خطی سازی شده در فضای حالت برای یک سیستم دینامیکی به

صورت زیر می توان آن را نمایش داد [۴]:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (1-2)$$

$$y = Cx + Du \quad (2-2)$$

ارزیابی پایداری سیگنال کوچک بر پایه آنالیز ویژگی های ماتریس A فضای حالت سیستم

می باشد. مقادیر ویژه یک ماتریس به صورت پارامترهای اسکالر (λ) به دست می آیند که جواب های

غیر بدیهی (غیر صفر) معادله زیر می باشند :

$$A\Phi_i = \lambda_i \Phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3-2)$$

که در رابطه بالا :

A : ماتریس $n \times n$ (برای سیستم های فیزیکی مانند سیستم قدرت مقداری حقیقی می باشد)

λ_i : یک عدد حقیقی یا مختلط که مقادیر ویژه ماتریس A می باشد. در حالت مقدار ویژه مختلط، این مقدار به صورت دو مقدار مزدوج مختلط می باشد.

Φ_i : یک بردار $n \times 1$ است. این بردار، بردار ویژه راست ماتریس A می باشد که به مقادیر ویژه وابسته می باشد. برای ماتریس A می توان n بردار ویژه راست به دست آورد.

هم چنین همانند بردار ویژه راست، یک بردار ویژه چپ نیز برای ماتریس A تعریف می شود که به صورت زیر تعریف می شود [۴]:

$$\Psi_i A = \lambda_i \Psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-2)$$

بردار های ویژه را می توان به صورت ماتریس های زیر نمایش داد :

$$\Psi = [\Psi_1^T \quad \Psi_2^T \quad \dots \quad \Psi_n^T]^T \quad (5-2)$$

$$\Phi = [\Phi_1 \quad \Phi_2 \quad \dots \quad \Phi_n]$$

در رابطه فوق Ψ بردار ویژه و Φ بردار ویژه راست می باشد.

با نرمالیزه کردن بردار های ویژه سمت چپ و سمت راست سیستم در نهایت بین دو بردار

ویژه چپ و راست سیستم خواهیم داشت :

$$\Psi \Phi = I \quad (6-2)$$

یا

$$\Psi = \Phi^{-1} \quad (7-2)$$

همان گونه که قبل از این توضیح داده شده است یک جفت مقدار ویژه مختلط $\lambda = \sigma \mp j\omega$ متعلق به یک مود نوسانی می باشد. قسمت حقیقی مقدار ویژه میزان میرایی^۱ را نشان می دهد، در حالی که قسمت موهومی نماینگر فرکانس نوسانات می باشد. اگر در یک مقدار ویژه قسمت حقیقی منفی باشد نوسان با کاهش مواجه می شود در حالی که قسمت حقیقی مثبت یک نوسان را نمایش می دهد که با افزایش دامنه همراه می باشد [۴].

فرکانس نوسانات با رابطه زیر مشخص می شود که واحد آن هرتز (Hz) می باشد.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (8-2)$$

در این نوسانات ضریب میرایی به صورت زیر تعریف می شود :

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (9-2)$$

در رابطه (۹-۲) ضریب میرایی ξ برای مقادیر ویژه نسبت از بین رفتن دامنه نوسانات را نشان می دهد.

در نهایت ماتریس مشارکت P را می توان محاسبه کرد که رابطه میان حالت ها و مقادیر ویژه سیستم را نمایش می دهد. این ماتریس از ضرب عناصر متناظر ماتریس های راست و چپ مقادیر ویژه در یکدیگر به دست می آید [۴].

^۱ Damping

$$P = \Phi \cdot \Psi^T \quad (10-2)$$

که برای هر عنصر ماتریس مشارکت می توان نوشت :

$$P_{ij} = \Phi_{ij} \cdot \Psi_{ji} \quad (11-2)$$

هر چه مقدار ضریب مشارکت P_{ij} بزرگتر باشد تاثیر متغیر حالت λ_i بر مقدار ویژه λ_j بیشتر خواهد شد.

۳-۲ آنالیز حساسیت مقادیر ویژه

همان گونه که توضیح داده شد رفتار سیگنال کوچک سیستم مورد مطالعه توسط ماتریس A قابل بررسی می باشد. آنالیز حساسیت یکی از مهم ترین بررسی هایی است که بر روی مقادیر ویژه سیستم قابل انجام است. در این قسمت به معرفی این روش پرداخته می شود. با مشتق گرفتن از معادله (۳-۲) نسبت به عنصر ردیف k ام و ستون j ام یا a_{kj} خواهیم داشت [۴] :

$$A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i$$

$$\frac{\partial A}{\partial a_{kj}}\Phi_i + A\frac{\partial \Phi_i}{\partial a_{kj}} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}}\Phi_i + \lambda_i\frac{\partial \Phi_i}{\partial a_{kj}} \quad (12-2)$$

حال اگر برداره ویژه چپ ماتریس A را در رابطه (۱۲-۲) پیش ضرب کنیم خواهیم داشت :

$$\Psi_i\frac{\partial A}{\partial a_{kj}}\Phi_i + \Psi_i A\frac{\partial \Phi_i}{\partial a_{kj}} = \Psi_i\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}}\Phi_i + \Psi_i\lambda_i\frac{\partial \Phi_i}{\partial a_{kj}} \quad (13-2)$$

با ساده سازی رابطه (۱۳-۲) خواهیم داشت :

$$\Psi_i\frac{\partial A}{\partial a_{kj}}\Phi_i + \Psi_i\frac{\partial \Phi_i}{\partial a_{kj}}(A - \lambda_i I) + \Psi_i\frac{\partial A}{\partial a_{kj}}\Phi_i = \Psi_i\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}}\Phi_i \quad (14-2)$$

در رابطه (۱۴-۲) با در نظر گرفتن $\Psi_i\Phi_i = 1$ و همچنین $\Psi_i(A - \lambda_i I) = \vec{0}$ به رابطه زیر

می توان دست یافت :

$$\Psi_i \frac{\partial A}{\partial a_{kj}} \Phi_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} \quad (15-2)$$

در رابطه (۱۵-۲) به این نکته باید توجه شود که تمامی مولفه های ماتریس $\frac{\partial A}{\partial a_{kj}}$ به جز عنصر سطر kام و ستون jام برابر با صفر می باشد. با توجه به این نکته خواهیم داشت :

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} = \Psi_{ik} \Phi_{ji} \quad (16-2)$$

۲-۴ منابع تجدید پذیر انرژی

در این قسمت برای آشنایی بیشتر از نحوه عملکرد، ساختار منابع تولید پراکنده و تاریخچه استفاده از آن ها به بررسی تعدادی از منابع تولید پراکنده^۱ پرداخته شده است.

۲-۴-۱ مولد فتوولتایک^۲

انرژی فتوولتایک به تبدیل نور خورشید به الکتریسیته از طریق یک سلول فتوولتایک گفته می شود، که به طور معمول توسط یک سلول خورشیدی انجام می پذیرد. مجموعه ای از سلول های فتوولتایک به همراه باتری و مبدل های قدرت، سیستم انرژی خورشیدی را تشکیل می دهند. توان تولیدی توسط مجموعه ای از سلول های فتوولتایک یا همان پنل فتوولتایک از ۰/۳ تا حدود ۱ مگاوات متغیر می باشد. یکی از بزرگترین پروژه های فتوولتایک اخیر یک واحد نیروگاه خورشیدی می باشد که با ظرفیت ۲۵۰ مگاوات در امارات متحده عربی بهره برداری شده است [۵-۶]. انرژی تولید شده از انرژی فتوولتایک به شدت تابش نور خورشید وابسته می باشد و به همین دلیل بازده انرژی الکتریسته از این روش به صورت یکنواخت نمی باشد و از ضریب اطمینان بالایی برخوردار نمی

^۱ DER(distributed energy resource)

^۲ Photovoltaic(PV)

باشد. پنل های خورشیدی در یک هکتار زمین می توانند حدود ۱۵۰ کیلو وات انرژی الکتریسته تولید کنند که برای تولید توان های بالا نیاز به زمین وسیعی می باشد [۷]. مشکل اساسی در سیستم انرژی خورشیدی را می توان نوسانات ولتاژ و تزریق هارمونیک های ضعیف بیان کرد که برای حل این مشکل می توان با یک کنترل داخلی در سیستم فتوولتاییک استفاده کرد که این سیستم کنترلی باید دارای ردیابی توان و پردازش خوبی باشد [۱]. مراکز تحقیقاتی متعددی در حال بررسی روش هایی برای بهبود سیستم های خورشیدی هستند تا بازده این سیستم را به حد مطلوبی برسانند و این منبع انرژی در آینده از منابع اصلی تامین انرژی در جهان خواهد بود. برای اتصال سیستم فتوولتاییک به شبکه اصلی از اینورتر های الکترونیک قدرت استفاده می شود که عمدتاً از اینورترهای منبع ولتاژی در این سیستم ها استفاده می شود.

۲-۴-۲ پیل سوختی^۱

پیل سوختی وسیله ای است که با فرآیند های شیمیایی انرژی شیمیایی را به انرژی گرمایی و در نهایت به انرژی الکتریسته تبدیل می کند. سیستم تولید انرژی در پیل سوختی را می توان مانند یک باتری در نظر گرفت که انرژی اکتريکی مورد نیاز را تامین می کند و توسط فرآیند های ذکر شده شارژ می شود. ظرفیت یک پیل سوختی می تواند از یک کیلووات تا حدود یک مگاوات متغیر باشد. سوخت استفاده شده در پیل سوختی می توان از انواع سوخت های هیدروژن دار مانند گاز طبیعی، بنزین، بیوگاز و پروپان استفاده شود. در پیل سوختی، فشار سوخت های ذکر شده با توجه به شرایط بهره برداری می تواند از یک اتمسفر تا صد ها اتمسفر متغیر باشد. پیل سوختی برای اتصال به شبکه و یا بار نیاز به مبدل های الکترونیک قدرت دارد که عمدتاً از اینورترهای منبع ولتاژی بهره برده می شود [۸،۹].

۲-۴-۳ توربین بادی

انرژی باد بوسیله توربین های بادی به انرژی الکتریسته تبدیل می شود. این توربین های بادی از تیغه های بزرگ، ژنراتور، ذخیره ساز انرژی، جعبه دنده و مبدل الکترونیک قدرت تشکیل می شوند. بازده تولید انرژی الکتریکی یک توربین بادی وابسته به تیغه ها و ژنراتور که مستقیماً به تیغه ها متصل است می باشد. امروزه مزارع بزرگ بادی برای تولید انرژی الکتریسته پاک استفاده می شوند. ظرفیت تولید مزارع بادی به طور عمد به سرعت باد وابسته است و بنابراین مزارع بادی در مکان هایی ایجاد می شوند که وزش باد در آن ها ماکزیمم باشد. بازده انرژی اکتريکی تولید شده در مزارع بادی تقریباً ۲۰ الی ۴۰ درصد و ظرفیت یک توربین بادی در حدود ۰،۳ الی ۵ مگا وات می باشد [۱۳]-[۱۰]، [۱].

توربین های بادی را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد [۱۳،۱۴]:

^۱ Feul cell

۱. توربین بادی سرعت ثابت که در ساخت آن از ژنراتور القایی قفس سنجابی استفاده شده است.

۲. توربین بادی سرعت متغیر جزئی که در ساخت آن از ژنراتور القایی با روتور واند استفاده شده است.

۳. توربین بادی سرعت متغیر با مبدل جزئی فرکانسی که در ساخت آن از ژنراتور القایی دو سو تغذیه استفاده شده است.

۴. توربین بادی سرعت متغیر با اینورتر و مبدل توان کامل که هم از ژنراتور القایی قفس سنجابی و یا ژنراتور القایی با روتور واند در آن به کار می رود.

۲-۴-۴ میکروتوربین

این توربین‌ها غالباً از موتورهای احتراقی کوچکی تشکیل می شوند که در آن‌ها از سوخت‌هایی مانند بیوگاز، گاز طبیعی و سایر سوخت‌های از این قبیل استفاده می شود. گنجایش تولید این توربین‌ها از ۲۰ الی ۵۰۰ کیلو وات می تواند با توجه به ابعاد میکروتوربین متفاوت باشد. میکروتوربین‌ها دارا سرعت عملکرد بالا و دمای کار پایینی می باشند. از مهم ترین مزیت‌های این مولد تولید پراکنده قابل حمل بودن و جابجایی به مکان دلخواه می باشد زیرا اندازه کوچکی دارند به علاوه نحوه نصب و نگهداری ساده ای نیز دارند [۱۴، ۱۵].

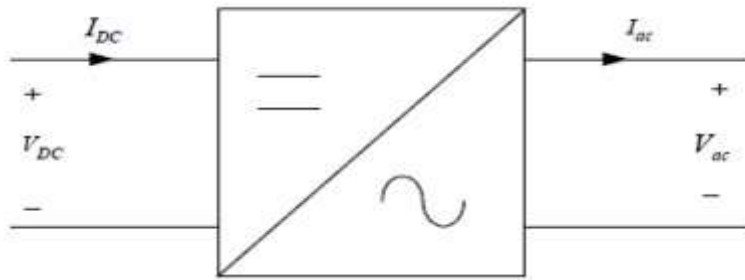
۲-۴-۵ سایر تولیدات پراکنده

غیر از تولیدات پراکنده معرفی شده، انواع دیگری نیز مانند بیومس^۱ و واحدهای کوچک آبی تولید انرژی الکتریسته و ... نیز وجود دارند که به دلایل اقتصادی و بهره برداری استفاده کمتری نسبت به انواع معرفی شده دارند.

^۱ Biomass

۲-۵ ساختار اینورتر

یکی از مهم ترین قسمت های ریز شبکه که نقش اساسی را در آن ایفا می کند اینورترها هستند. اینورتر در واقع یک مبدل الکترونیک قدرت می باشد که جریان مستقیم را به جریان متناوب تبدیل می کند. در اینورتر می توان با توجه به نیاز، ولتاژ و فرکانس خروجی را تنظیم نمود. اینورترها به طور عمده برای تولید برق AC از منابع DC مانند پیل های خورشیدی یا باتری ها استفاده می شوند. در شکل (۲-۴) دیاگرام کلی یک اینورتر را می توان مشاهده کرد. اینورترها دو دسته عمده تقسیم می شوند که در ادامه توضیح داده شده اند.

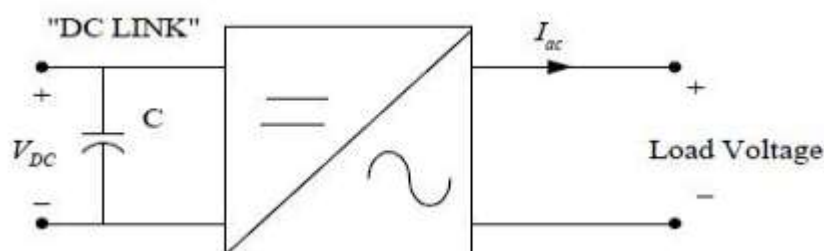


شکل (۲-۴)-دیاگرام کلی یک اینورتر [۱۶]

۲-۵-۱ اینورترهای منبع ولتاژ^۱

از اینورترهای منبع ولتاژی زمانی استفاده می شود که توان AC در خروجی اینورتر به صورت یک منبع ولتاژ مهیا شود. ولتاژ DC ورودی می تواند یک منبع مستقل مانند باتری باشد که به آن لینک DC گفته می شود. از این ساختار به صورت گسترده در صنایع استفاده می گردد که می توان از جمله کاربرد هایش به درایوهای کنترل سرعت اشاره کرد. در شکل (۲-۵) دیاگرام اینورتر منبع ولتاژی را می توان مشاهده کرد. از مدل تک فاز اینورترهای منبع ولتاژی در کاربرد های توان پایین استفاده می گردد در حالی که مدل سه فاز این اینورتر در توان های متوسط و بالاتر استفاده می شود [۱۷].

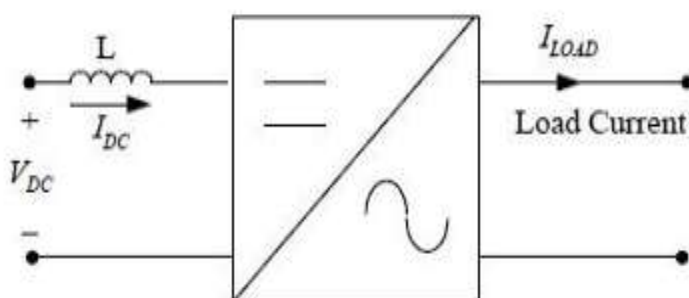
^۱ Voltage source inverter (VSI)



شکل (۵-۲) - اینورتر منبع ولتاژ [۱۶]

۲-۵-۲ اینورتر منبع جریان^۱

ولتاژ DC در اینورترهای منبع جریان به جریان ثابت که ولتاژ آن متناسب با بار تبدیل می شود. در این اینورتر حفاظت به وسیله یک خازن موازی انجام می شود. در شکل (۶-۲) شماتیک اینورتر منبع جریان مشاهده می شود.



شکل (۶-۲) - اینورتر منبع جریان [۱۶]

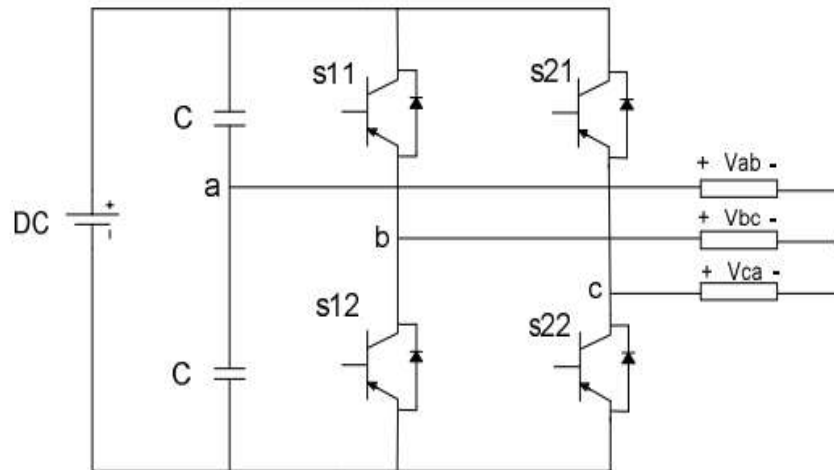
۳-۵-۲ اینورتر سه فاز

همان گونه که در قسمت قبل نیز توضیح داده شد اینورترهای تک فاز برای توان های متوسط و بالاتر مناسب نمی باشد و در این توان ها از اینورترهای سه فاز استفاده می شود. اینورترهای سه فاز به صورت عمده در درایوهای موتور ها، فیلترهای اکتیو، سیستم یو پی اس^۲ و برای تولید فرکانس های ولتاژ AC قابل کنترل استفاده می شوند. دو نمونه اینورتر سه فاز در شکل های

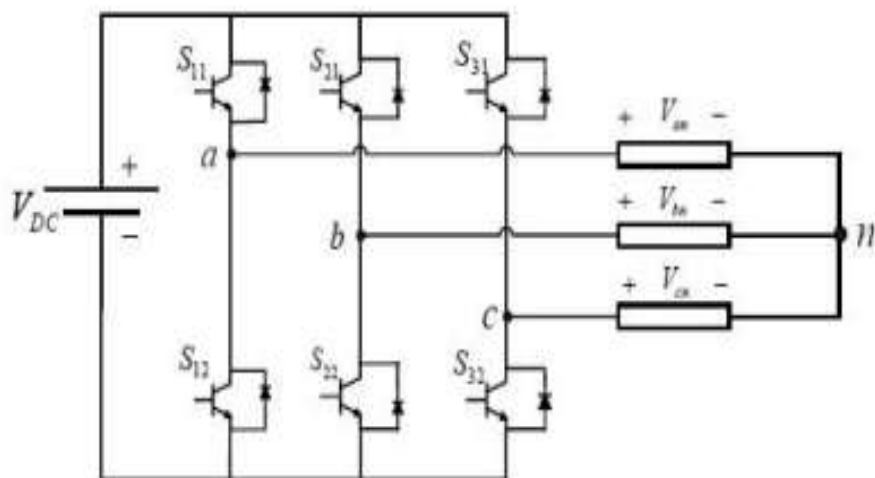
^۱ Current Source Inverter(CSI)

^۲ Uninterruptible power supply (UPS)

(۷-۲) و (۸-۲) مشاهده می شوند که به ترتیب اینورتر سه فاز منبع ولتاژی نیم پل و تمام پل می باشند.



شکل (۷-۲) - اینورتر سه فاز منبع ولتاژی نیم پل



شکل (۸-۲) - اینورتر سه فاز منبع ولتاژی تمام پل

۶-۲ وضعیت های عملکرد ریز شبکه

ریز شبکه ها با توجه به شرایط می تواند در دو وضعیت مختلف عملکرد داشته باشد. ویژگی

های این دو حالت در ادامه توضیح داده شده اند.

۲-۶-۱ وضعیت عملکردی متصل به شبکه^۱

هنگامی که ریز شبکه متصل به شبکه اصلی می باشد، رفتار دینامیکی سیستم متأثر از شبکه اصلی می باشد و در عمل ریز شبکه تاثیر قابل توجهی در دینامیک شبکه ندارد و در این وضعیت وظیفه تزریق توان به سیستم را بر عهده دارد.

۲-۶-۲ وضعیت عملکردی مستقل از شبکه

غالبا در زمان وقوع خطا در شبکه، توسط ادوات حفاظتی به سرعت ریز شبکه ها از شبکه اصلی جدا می شود و به صورت مستقل به عملکرد خود ادامه می دهد. در این حالت علاوه بر تامین توان بار، تنظیم فرکانس و ولتاژ ریز شبکه توسط خود ریز شبکه کنترل می شود و روش کنترلی با حالت متصل به شبکه متفاوت است. در این شرایط بررسی رفتار دینامیکی ریز شبکه اهمیت دو چندانی می یابد.

۲-۷-۱ روش کنترل ریز شبکه در حالت مستقل از شبکه

در حالت مستقل از شبکه همان گونه که توضیح داده شد روش کنترلی با حالت متصل به شبکه متفاوت است و نیاز به یک روش کنترلی مختص با شرایط ریز شبکه می باشد. قسمت اصلی کنترل ریز شبکه در واقع به کنترل اینورتر در ریز شبکه باز می گردد. رایج ترین روش کنترلی در این حالت برای ریز شبکه کنترل دروپ ولتاژ و فرکانس می باشد. در این پایان نامه نیز روش به کار گرفته شده جهت کنترل اینورتر های ریز شبکه، کنترل دروپ ولتاژ و فرکانس می باشد که توضیح مختصری در این بخش در ادامه داده می شود.

۲-۷-۱-۱ کنترل دروپ^۲

استراتژی کنترلی دروپ برای بهبود بخشیدن به عملکرد دینامیکی اینورترهای موازی در

^۱ Grid connected

^۲ Droop Control

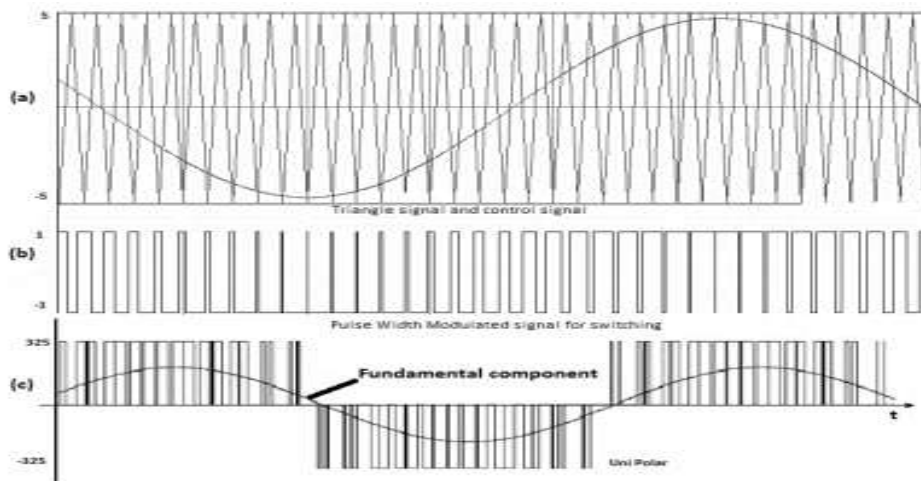
میکروگریدها به کار گرفته می شود. در این روش کنترلی توان اکتیو و راکتیو متغیرهای کنترلی اصلی می باشند که با استفاده از این مولفه های کنترلی دقت در تقسیم توان افزایش می یابد. البته مولفه های دیگری نیز برای بهبود عملکرد دینامیکی در کنار کنترل دروپ در نظر گرفته می شوند. بر اساس کنترل دروپ شکل موج های رفرنس برای اینورترها ساخته می شود که با استفاده از روش مدولاسیون پهنای باند پالس کنترلی به اینورترها ارسال می شود تا بر اساس شکل موج مرجع ساخته شده اینورترها به تولید ولتاژ AC پردازند.

۲-۷-۲ روش مدولاسیون پهنای باند^۱

در این روش که به PWM معروف است به کمک کلیدزنی سریع سیگنال AC مرجع ورودی به فرکانس های بالا مدوله می شود و عملاً هارمونیک های غیر مهم را دور می کند، که در نتیجه اعوجاج هارمونیکی کل^۲ و هارمونیک های درجه پایین تر به نحو قابل ملاحظه ای کمتر می گردند. روش مدولاسیون به این نحو است که یک موج مثلثی با فرکانس حامل که همان فرکانس سوئیچینگ است، برای تلاقی با سیگنال های سینوسی مرجع سه فاز ساخته می شود. سپس برای هر فاز اگر دامنه ی موج مثلثی از موج مرجع آن فاز کمتر بود سوئیچ بالایی مربوط به همان فاز روشن می شود، و چنانچه مقدارش بیشتر بود سوئیچ پایینی روشن می گردد. به این طریق موج سینوسی ورودی حدود ۵۰ هرتز به موج مدوله شده ی به فرکانس حامل انتقال میابد. شکل (۲-۹) نحوه ی کلیدزنی و شکل موج ولتاژ خط را نمایش می دهد [۱۸-۱۹].

^۱Pulse Width Modulation (PWM)

^۲Total Harmonic Distrouction(THD)



شکل (۹-۲) - عملکرد مدولاسیون پهنای باند (PWM) [۱۷]

۸-۲ انواع بار در ریز شبکه

در یک ریز شبکه ممکن است چندین نوع بار وجود داشته باشد که هر کدام از انواع بار تاثیر مختلفی بر روی رفتار و پایداری ریز شبکه خواهد گذاشت. یکی از این نوع بارها بار توان ثابت^۱ می باشد. با گسترش و کاربرد سریع تولیدات پراکنده در شبکه قدرت، بارهای توان ثابت به یکی از انواع بارهای رایج در ریز شبکه ها تبدیل شده است که به صورت یک مقاومت منفی معرفی می شود که تاثیر زیادی بر شبکه قدرت دارد. بارهای توان ثابت در شبکه های جریان مستقیم رایج می باشند [۲۰]. در این پژوهش سعی شده است تا علاوه بر بارهای رایج به مدل سازی بار توان ثابت نیز در ریز شبکه و تاثیر آن بر پایداری سیستم پرداخته شود.

۹-۲ بررسی کارهای اخیر در زمینه سیگنال کوچک ریز شبکه ها

در مقالات متعددی به بررسی و تحقیق در زمینه پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه ها پرداخته شده است [۲۱-۳۳] که در منابع [۲۱]، [۲۳]، [۲۴] بر روی موضوع پایداری دینامیکی سیستم های تولید پراکنده در حضور مبدل های الکترونیک قدرت پرداخته شده است. در مرجع [۲۲] تاثیر وجود موتورهای القایی دو سو تغذیه در ریز شبکه و تاثیر آن بر روی پایداری سیستم مطرح گردیده

^۱ Constant Power Load (CPL)

است. در منابع [۲۸]-[۲۵] پخش بار به وسیله حلقه کنترلی جریان و ولتاژ و تاثیر این موضوع بر پایداری سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. در منابع [۲۹]، [۳۰] مدل سازی ریز شبکه و بررسی پایداری آن در حضور اینورتر های منبع ولتاژی بررسی شده است که از آنالیز مقادیر ویژه و نتایج حوزه زمان برای بررسی تاثیر فیدبک های کنترلی در پایداری سیستم استفاده شده است. در مراجع [۳۱]-[۳۳] به موضوع پایداری سیستم در حضور اینورتر های منبع ولتاژی مورد مطالعه قرار گرفته و بیشتر بر روی این موضوع تاکید شده است. در منبع [۳۳] یک حلقه کنترلی تکمیل کننده برای سیستم کنترلی ریز شبکه پیشنهاد شده است که بهبود پایداری سیستم را به همراه داشته است. پایداری ریز شبکه در حالت جزیره ای در منابع [۳۴]، [۳۵] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که تاثیر شرایط مختلف بار در حالت جزیره ای شده در مراجع [۳۵-۳۷] بررسی شده است و همچنین یک روش کنترلی مبتنی بر مقاومت مجازی نیز ارایه شده است. در منبع [۳۷] تاثیر کنترل فرکانسی به وسیله نوسان ساز درونی و فیدبک ولتاژ برای تنظیم ولتاژ ریز شبکه بعد از جزیره ای شدن مشاهده می شود

هم چنین در سالیان اخیر محققین بسیاری در زمینه مدل سازی ریز شبکه ها به تحقیق و بررسی پرداخته اند. روش کنترل اینورتر ها از روش کنترل دروپ که ابتدا برای کنترل ماشین های سنکرون موازی استفاده می شد اقتباس شده است [۳۸]. در ادامه توسط محققین دیگر مانند جانسن و همکاران [۳۹] که در پخش توان میان اینورتر های موازی به گسترش این مساله کمک کردند اما وارد بحث ریز شبکه ها و تولیدات پراکنده نشده اند. در زمینه مدل سازی ریز شبکه مستقل از شبکه در سال ۲۰۰۲ مدل اولیه و خوبی برای اینورتر های موازی توسط آقای آلوز و همکاران ارایه شد که از برخی پارامتر های ریز شبکه صرف نظر شده بود که به وسیله آن به بررسی سیگنال کوچک این سیستم پرداخته شده بود این مدل در واقع آغازی برای بررسی ریز شبکه های مستقل از شبکه و رفتار سیگنال کوچک ریز شبکه بوده است اما به دلیل اینکه از حلقه های کنترلی ولتاژ و جریان صرف

نظر شده و همچنین نوع فیلتر به کار رفته در آن بسیار ساده بوده است [۴۰] توسط محققین دیگر مانند پوکاگو و همکاران [۴۱] و گویررو [۴۲] به تکمیل مدل ریز شبکه پرداخته و مدل تقریباً کاملی را ارائه کردند که در این مدل ها جزییات و در این مقالات از جزییات و روش کنترلی پیچیده تری استفاده شده است ، همچنین مدل های فضای حالت متعددی برای ریز شبکه های جزیره‌ای که در بررسی پایداری سیگنال کوچک مورد استفاده قرار میگیرد پیشنهاد شده است که تمرکز این پژوهش ها عمدتاً بر روی روش های کنترل توان و تاثیر این روش ها بر روی پایداری سیستم بوده است [۴۳]-[۴۹] .

۲-۱۰ جمع بندی

در این فصل پس از معرفی انواع تولیدات پراکنده و انواع پایداری در سیستم های قدرت، تغییرات شبکه های قدرت از گذشته تا به امروز مورد بررسی قرار گرفته است، در ادامه به معرفی انواع تولیدات پراکنده و انواع اینورترها پرداخته شده است، سپس روش کنترلی دروپ در ریز شبکه ها معرفی شده است و در انتها کارهای انجام شده محققان مختلف در مورد روش های کنترلی در ریز شبکه های مبتنی بر اینورتر معرفی گردیده است.

فصل سوم

مدل فضای حالت ریز شبکه مستقل از شبکه

۱-۳ مقدمه

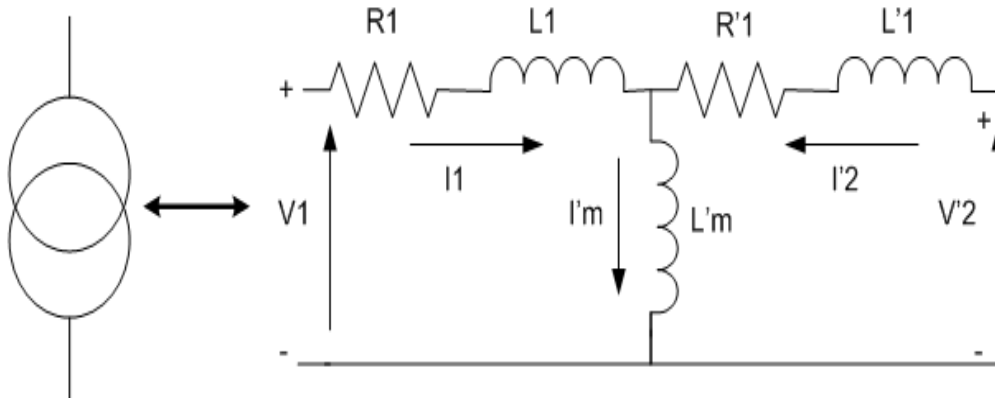
مدل سازی اولین مرحله جهت آنالیز یک پدیده طبیعی می باشد. در مدل سازی با توجه به میزان دقت مورد نیاز، به طراحی و مدل کردن اجزا می پردازیم. پرواضح است که هر چه مدل دقیق تر و دارای جزئیات بیشتر باشد آنگاه یک مدل نزدیک تر به واقعیت خواهیم داشت. استفاده از مدل های بسیار ساده ما را از نتایج واقعی دور خواهد کرد در عین حال مدل کردن بسیار دقیق جزئیات سخت و پیچیده خواهد بود. بنابراین با توجه به پارامتر های مورد بررسی در مساله جزئیات را انتخاب و مدل سازی می کنیم.

این فصل به مدل سازی دینامیکی یک ریز شبکه و جزئیات مورد نیاز در مساله می پردازد. در این پژوهش حالت مستقل از شبکه برای ریز شبکه مورد نظر می باشد. ساختار مدل پیشنهادی در این فصل در پژوهش های پیشین توسط افراد متعددی مورد استفاده و بررسی قرار گرفته شده است و مدل مناسبی جهت بررسی موضوع مورد نظر می باشد. در نهایت از مدل ریز شبکه به دست آمده در این فصل جهت شبیه سازی و بررسی پایداری و رفتار ریز شبکه مورد استفاده قرار گرفته شده است.

۲-۳ مدل سازی فضای حالت

در این مرحله ابتدا لازم است تمامی اجزای سیستم را به صورت یک معادل که می تواند ترکیبی از سلف و خازن و مقاومت و... باشد نشان داده شوند. حال برای هر قسمت با توجه به اجزای به کار رفته در آن می توان یک معادله دیفرانسیل نوشت. در نهایت با ساده کردن معادلات دیفرانسیل بر اساس متغیر های حالت به یک معادله فضای حالت برای هر قسمت از سیستم دست یافته می شود. در نوشتن معادله فضای حالت به این نکته باید توجه کرد که در حالت متداول جریان سلف و ولتاژ خازن ها به عنوان متغیر های حالت استفاده می شوند اما گاهی به دلیل غیر خطی بودن مساله شار سلف و بار خازن به عنوان متغیر های حالت استفاده می شوند. برای جهت واضح تر شدن مراحل فوق با یک مدل سازی ساده وارد مساله می شویم. در شکل (۱-۳) مدل مداری یک ترانس تک فاز را

مشاهده می شود [۲].



شکل (۱-۳) - مدار معادل ترانسفورماتور تک فاز دو سیم پیچه (صرف نظر از تلفات آهن) [۲]

همان طور که در شکل فوق مشاهده می شود تمامی المان های ترانسفورماتور به سمت اولیه منتقل شده است. مطابق توضیحاتی که در بند قبل داده شد می توان معادلات را به صورت زیر نوشت :

$$V_{R1} = R_1 I_1 \quad (1-3)$$

$$V'_{R1} = R'_2 I'_2 \quad (2-3)$$

$$V_{L1} = L_1 \frac{dI_1}{dt}, \quad V'_{L1} = L'_2 \frac{dI'_2}{dt}, \quad V'_{Lm} = L'_m \frac{dI'_m}{dt} \quad (3-3)$$

در معادله فوق ولتاژ اجزای مختلف مدار شکل (۱-۳) نوشته شده اند، همچنین قوانین جریان

و ولتاژ کیرشهف با توجه به شکل (۱-۳) به صورت زیر نوشته می شوند :

$$i_1 + i'_2 - i'_m = 0 \quad (4-3)$$

$$-V_1 + V_{R1} + V_{L1} + V'_m = 0 \quad (5-3)$$

$$-V'_2 + V'_{R2} + V'_{L2} + V'_m = 0 \quad (6-3)$$

با جایگذاری معادله (۳-۱)، (۳-۲) و (۳-۳) در معادلات (۳-۴)، (۳-۵) و (۳-۶) می توان به

معادلات ساده شده ترانسفورماتور دست یافت :

$$-V_1 + R_1 i_1 + (L_1 + L'_m) \frac{di_1}{dt} + L'_m \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (7-3)$$

$$-V_2 + R_2 i_2 + (L_2 + L'_m) \frac{di_2}{dt} + L'_m \frac{di_1}{dt} = 0 \quad (8-3)$$

با ساده سازی و نوشتن معادله (۷-۳) و (۸-۳) شکل ماتریسی معادلات به دست می آید. که

هدف نهایی در این قسمت به دست آوردن معادلات به شکل $\dot{x} = Ax + BU$ یا همان معادله فضای

حالت سیستم می باشد که در معادله (۹-۳) این معادله نمایش داده می شود :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 \frac{L'_2 + L'_m}{L_\psi} & R_2 \frac{L'_m}{L_\psi} \\ R_1 \frac{L'_m}{L_\psi} & -R_2 \frac{L_1 + L'_m}{L_\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L'_2 + L'_m}{L_\psi} & \frac{L'_m}{L_\psi} \\ \frac{L'_m}{L_\psi} & \frac{L_1 + L'_m}{L_\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (9-3)$$

در مثال فوق نحوه نوشتن معادلات حالت برای یک قسمت از سیستم قدرت نوشته شده است

در ادامه مشابه روند توضیح داده شده معادلات سیستم اصلی به دست خواهند آمد.

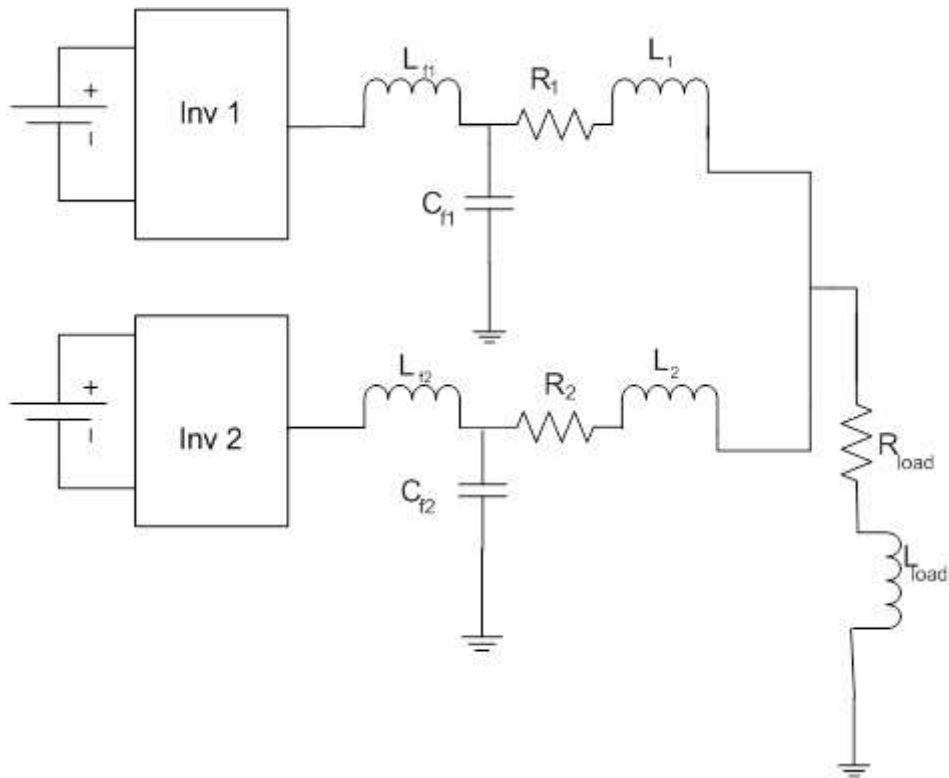
۳-۳ مدل سازی ریز شبکه مستقل از شبکه

در این قسمت بر اساس روشی که در بخش ۲-۳ توضیح داده شد برای قسمت های مختلف

یک ریز شبکه نیز عمل خواهد شد و معادلات سیگنال کوچک در فضای حالت به دست آورده خواهند

شد. در این پایان نامه ریز شبکه با یک مدل مداری که از چندین قسمت مختلف تشکیل شده است

نمایش داده می شود. مدار معادل ریز شبکه مستقل از شبکه را می توان در شکل (۲-۳) مشاهده کرد.



شکل (۲-۳) - ساختار ریز شبکه مورد مطالعه

ریز شبکه مستقل از شبکه نمایش داده شده در شکل (۲-۳) از دو مولد تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر تشکیل می شود و منبع تولید پراکنده با یک منبع ولتاژ DC نمایش داده شده است. در ریز شبکه مورد بررسی برخی ساده سازی ها در نظر گرفته شده است و برای جلوگیری از پیچیدگی تمام جزئیات در نظر گرفته نشده است. همان گونه که در فصل قبل اشاره شد روش کنترلی دروپ ابتدا در سیستم های با ماشین های سنکرون استفاده می شده است اما در صورتی که سیستم در حالت مستقل از شبکه باشد و توسط ماشین های سنکرون تغذیه شود سیستم مشخصه های ذاتی زیر را خواهد داشت :

۱. تغییرات سریع فرکانس بوسیله اینرسی روتور مهار می شود.
۲. فرکانس کاری و توان اکتیو خروجی وابسته به یکدیگرند به شکلی که هنگامی که توان مکانیکی ورودی ثابت باشد در صورت افزایش توان خروجی، فرکانس کاهش می یابد.

۳. دو یا چند ماشین سنکرون با اتصال موازی به دلیل وجود مولفه گشتاور سنکرون سازی گرایش به سنکرون شدن دارند.

۴. پایداری سیستم بستگی به وجود مقدار کافی گشتاور سنکرون سازی و گشتاور تعدیل کننده دارد.

۵. پایداری ولتاژ وابسته به تقاضای توان اکتیو می باشد.

اما در سیستم مبتنی بر اینورتر بین فرکانس و توان اکتیو خروجی وابستگی ذاتی وجود ندارد همچنین این قضیه میان ولتاژ خروجی و توان اکتیو خروجی نیز صادق است. بنا بر این هنگامی که اینورتر های موازی در شبکه مورد استفاده قرار می گیرد، نیاز به استفاده از روش کنترلی دروپ مختص این سیستم می باشد و نمی توان از روش های رایج در ماشین های سنکرون بهره برد [۱۹].

۳-۳-۱ روش کنترل ریز شبکه

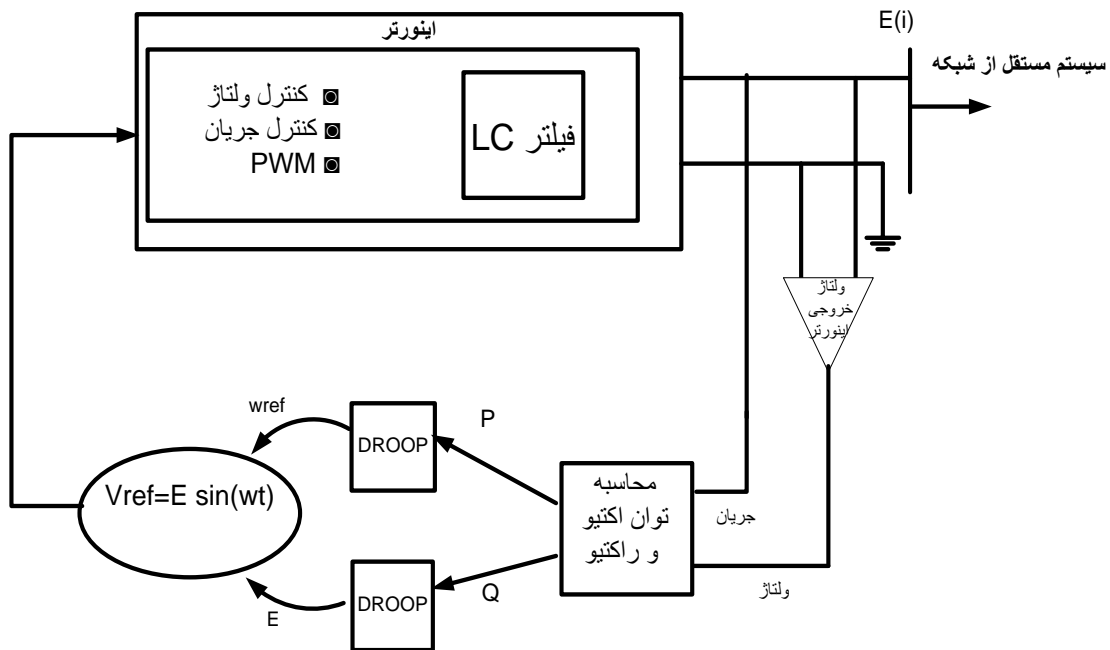
با توجه به ساختار سیستم مورد بررسی که در شکل (۳-۲) نمایش داده شده است، نیاز است که روش کنترلی متناسب با ساختار و مشخصات این ریز شبکه استفاده شود. قسمت های مختلف سیستم کنترلی متناسب با ریز شبکه مبتنی بر اینورتر در حالت جزیره ای در ۳-۳ نمایش داده شده است. در این شکل حلقه های کنترلی به دو دسته تقسیم می شوند:

۱. حلقه کنترلی دروپ

۲. حلقه های کنترلی جریان و ولتاژ

حلقه کنترل دروپ وظیفه تقسیم توان بین اینورتر ها را بر عهده دارد در حالی که حلقه های

کنترلی ولتاژ و جریان به تنظیم ولتاژ و جریان اینورتر ها می پردازند. در ادامه معادلات روش کنترلی دروپ برای ریز شبکه مورد بررسی به دست آورده می شوند.



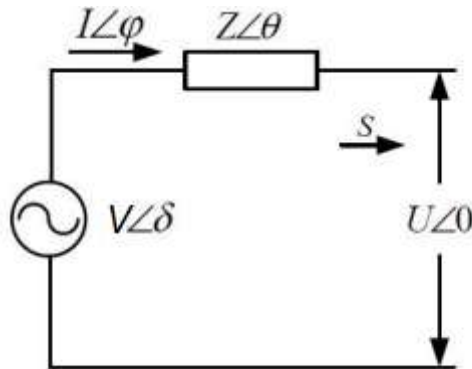
شکل (۳-۳) دیاگرام کنترلی ریز شبکه مبتنی بر اینورتر مستقل از شبکه

۳-۳-۱-۱ معادلات روش دروپ

روش کنترلی دروپ جهت پخش توان برای تمامی مولد های تولید پراکنده در سیستم در نظر گرفته شده است. در این روش فرض می شود که تمام بار مورد نیاز در ریز شبکه توسط مولد های تولید پراکنده پشتیبانی می شود و نیازی به بارزدایی نمی باشد. ولتاژ خروجی مولد ها به عنوان اهمم کنترلی جهت پخش بار متناسب با ریز مولد ها در نظر گرفته می شود و با توجه به نتایج این قسمت می توان به این موضوع پی برد که توان اکتیو و راکتیو تزریقی توسط مولد تولید پراکنده توسط اندازه ولتاژ کنترل می شود. تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر را می توان همانند شکل (۳-۴) به صورت یک منبع ولتاژ که با یک امپدانس به باس AC متصل است در نظر گرفت که در این حالت برای توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط منبع تولید پراکنده را می توان به صورت زیر نوشت [۴۱]:

$$P = \frac{U}{Z} [R(V \cos\delta - U) + XV \sin\delta] \quad (۱۰-۳)$$

$$Q = \frac{U}{Z} [X(V \cos \delta - U) + RV \sin \delta] \quad (11-3)$$



شکل (۳-۳) - مدل معادل ساده شده تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر

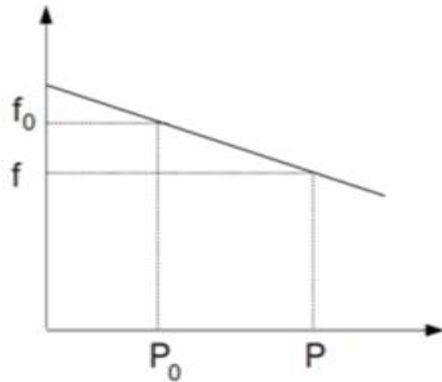
از آن جایی که $Z < \theta = R + jX$ نمایش داده می شود و این امپدانس مجموع امپدانس خروجی اینورتر و خط پیش روی آن می باشد و امپدانس خط به شکل عمده دارای خاصیت اندوکتیو می باشد، $X \gg R$ ، لذا می توان گفت $\theta \approx 90^\circ$ و بر اساس این فرض معادلات توان اکتیو و راکتیو را به صورت زیر نوشت :

$$P = \frac{VU}{X} \sin \delta \quad (12-3)$$

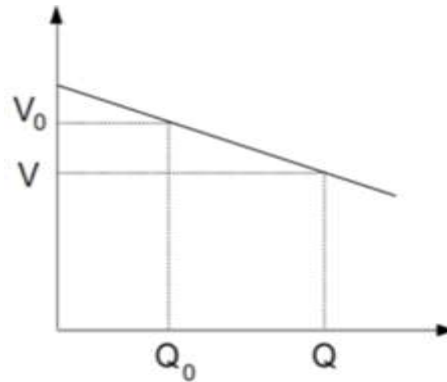
$$Q = \frac{U(V \cos \delta - U)}{X} \quad (13-3)$$

در کاربرد های عملی، تفاوت زاویه ولتاژ منبع و باس AC بسیار کوچک می باشد، به عبارت دیگر می توان با توجه به شکل (۳-۴)، زاویه δ را تقریباً مساوی صفر در نظر گرفت ($\delta \approx 0$) و در این حالت $\sin \delta \approx \delta$ و $\cos \delta \approx 1$ می باشند و بر این اساس به این موضوع پی برده می شود که توان اکتیو عمدتاً به اختلاف زاویه میان ولتاژ تولید پراکنده و باس AC (δ) وابسته است [۴۱]، در حالی که توان راکتیو به اندازه ولتاژ تولیدی توسط تولید پراکنده یا (V) بستگی دارد. کنترل دروپ بر اساس

همین وابستگی میان پارامترهای فوق تعریف می شود. معادلات و نمودارهای دروپ ولتاژ و فرکانس نمایانگر ارتباط میان مولفه های دروپ در سیستم مبتنی بر اینورتر مورد مطالعه می باشد. شکل (۳-۳) و شکل (۳-۴) نمودارهای دروپ را نمایش می دهند.



شکل (۳-۵)-نمودار دروپ فرکانس بر حسب توان اکتیو



شکل (۳-۴)-نمودار دروپ ولتاژ بر حسب توان راکتیو

$$f = f_0 - K_p(p - p_0) \quad (۳-۱۵)$$

$$V = V_0 - K_q(Q - Q_0) \quad (۳-۱۴)$$

در معادلات (۳-۱۴) و (۳-۱۵) پارامترهای f و V فرکانس و ولتاژ خروجی اینورتر در حالت بی باری می باشند. P_0, Q_0 مقادیر رفرنس برای توان اکتیو و راکتیو در نظر گرفته شده اند و متغیرهای K_p, K_q به ترتیب ضرایب دروپ برای فرکانس و اندازه ولتاژ می باشند. در رابطه (۳-۱۵) می توان به جای فرکانس از فرکانس زاویه ای (ω) نیز استفاده کرد البته باید دقت شود که تمام رابطه (۳-۱۵) در عدد 2π ضرب می شوند.

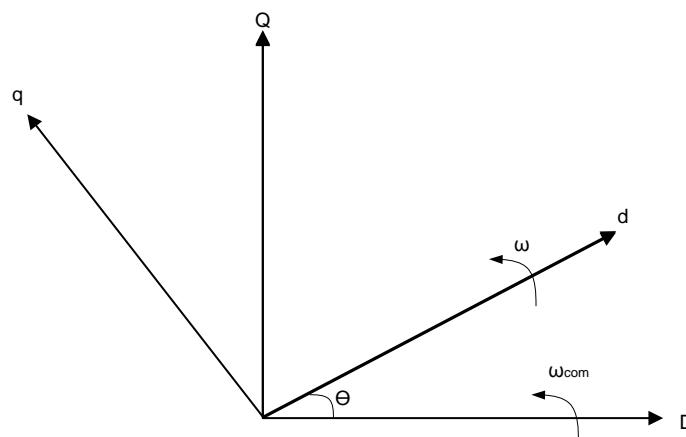
۳-۴ معادلات فضای حالت سیستم

در این قسمت با نوشتن معادلات قسمت های مختلف برای ریز شبکه در حالت جزیره ای

نشان داده شده در شکل (۳-۲) و ترکیب معادلات فضای حالت به دست آورده برای قسمت های مختلف به یک مدل کامل برای ریز شبکه دست خواهیم یافت و در فصل بعد بر اساس این معادلات شبیه سازی و تحلیل ها انجام می شوند.

۳-۴-۱ تبدیلات مختصات

در این پایان نامه برای هر مولد مبتنی بر اینورتر یک مدل در فضای d-q به دست آورده می شود و مدل سیگنال کوچک هر اینورتر در فضای d-q متناظر با فرکانس زاویه ای (ω) و ولتاژ خروجی آن اینورتر تعیین می گردد. برای به دست آوردن مدل سیگنال کوچک کلی سیستم نیاز است که همه مدل ها به وسیله یک تبدیل به یک فضای واحد منتقل شوند. برای حل این چالش یک فضای مرجع D-Q در نظر گرفته می شود و بقیه معادلات به این فضا منتقل می شوند. این فضای مرجع، فضای D-Q یکی از اینورتر ها می باشد که به عنوان اینورتر مرجع انتخاب می شود و سایر اینورتر ها به این فضا منتقل می شوند. برای سیستم مورد بررسی شکل (۳-۷) به خوبی مفهوم را بیان می کند [۴۱].



شکل ۳-۶- سیستم تبدیل مختصات [۲۲]

در شکل (۳-۷) پارامتر ω_{com} فرکانس زاویه ای اینورتر مرجع در مختصات مرجع می باشد

و ω فرکانس زاویه ای در مختصات اینورتر دیگر می باشد. همانگونه از شکل مشخص است، زاویه θ

$$f_{DQ} = T f_{dq} \quad (۱۶-۳)$$

اختلاف زاویه میان محور D و d می باشد. تبدیل از مختصات اینورتر غیر مرجع به اینورتر مرجع به صورت مختصر به صورت زیر می باشد :

صورت معکوس معادله فوق نیز عبارت است از :

$$f_{DQ} = T^{-1} f_{dq} \quad (۱۷-۳)$$

که در معادلات فوق داریم [۴۱] :

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (۱۹-۳) \quad T^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (۱۸-۳)$$

۲-۴-۳ مدل سیگنال کوچک اینورتر های موازی

اینورتر ها از چندین قسمت مختلف تشکیل می شوند که هر قسمت به صورت مجزا به دست خواهد آمد و سپس در نهایت با ادغام همه قسمت ها به یک مدل سیگنال کوچک نهایی دست خواهیم یافت.

۱-۲-۴-۳ مدل سیگنال کوچک واحد کنترل توان

در شکل (۷-۳) می توان θ را به صورت معادله زیر نمایش داد :

$$\theta = \int (\omega - \omega_{com}) dt \implies \Delta \dot{\theta} = \Delta \omega_{com} \quad (۲۰-۳)$$

معادله فوق اولین معادله سیگنال کوچک می باشد که از تفاوت زاویه میان اینورتر مرجع با سایر اینورتر ها به دست می آید. در ادامه رابطه ولتاژ و جریان هر اینورتر به وسیله تبدیل پارک به

فضای d-q منتقل می شوند و به کمک آن ها توان اکتیو و راکتیو هر اینورتر محاسبه می شوند. توان های خروجی هر اینورتر توسط روابطه (۲۱-۳) و (۲۲-۳) محاسبه می شوند.

$$p = U_{od} i_{od} + U_{oq} i_{oq} \quad (21-3)$$

$$q = U_{od} i_{oq} - U_{oq} i_{od} \quad (22-3)$$

در روابط فوق U_{od} و U_{oq} به ترتیب ولتاژهای محور d و q و i_{od} و i_{oq} و جریان های محور d و q خروجی اینورترها می باشند.

به منظور مینیمم کردن اثر هارمونیک ها بر روی توان اکتیو و راکتیو لحظه ای نیاز به یک فیلتر پایین گذر می باشد و در این پایان نامه از فیلتر LC جهت کاهش هارمونیک ها استفاده شده است. فیلتر پایین گذر در خروجی اینورترها را می توان به صورت معادلات (۲۳-۳) و (۲۴-۳) مدل سازی کرد :

$$P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} p \quad (23-3)$$

$$Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} q \quad (24-3)$$

در معادله (۲۳-۳) و (۲۴-۳) متغیر ω_c فرکانس قطع فیلتر پایین گذر می باشد و S عملگر لاپلاس می باشد. با جایگذاری معادله (۲۳-۳) در معادله (۱۵-۳) خواهیم داشت :

$$\omega = \omega_n - m' \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (p - p_0) \quad (25-3)$$

با نوشتن شکل سیگنال کوچک رابطه فوق خواهیم داشت :

$$\Delta\omega = -m' \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta p \quad (26-3)$$

در ادامه با ساده سازی رابطه فوق به رابطه (۲۷-۳) خواهیم رسید.

$$s\Delta\omega = -m'\omega_c \Delta p + \omega_c\Delta\omega \Rightarrow \Delta\dot{\omega} = -m'\omega_c \Delta p + \omega_c\Delta\omega \quad (27-3)$$

در رابطه (27-3) در معادله دروپ m' برابر با $2\pi \cdot K_p$ می باشد.

هم چنین با جایگذاری رابطه (24-3) در رابطه (14-3) برای توان راکتیو خواهیم داشت :

$$U = U. - K_q \frac{\omega_c}{s+\omega_c} (Q - Q.) \quad (28-3)$$

با بیان شکل سیگنال کوچک رابطه فوق در حوزه زمان و سپس در حوزه لاپلاس به صورت

زیر خواهد بود :

$$\Delta U = -K_q \frac{\omega_c}{s+\omega_c} \Delta Q \quad (29-3)$$

در نهایت با ساده سازی برای توان راکتیو اینورتر ها خواهیم داشت :

$$\Delta \dot{U} = -K_q \omega_c Q - \omega_c \Delta U \quad (30-3)$$

در روش دروپ برای تقسیم توان بین چند اینورتر چنان عمل می شود که ولتاژ مرجع

خروجی برای اینورتر مرجع با معادله (31-3) و (32-3) مشخص شود [41].

$$u_{od}^* = V_n - K_q \quad (31-3) \quad u_{oq}^* = 0 \quad (32-3)$$

با استفاده از معادلات (20-3) تا (30-3) برای معادلات فضای حالت قسمت کنترل توان

اینورتر به شکل $\dot{x} = Ax + BU$ خواهیم داشت :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{P} \\ \Delta \dot{Q} \end{bmatrix} = A_p \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} + B_p \begin{bmatrix} \Delta i_{ld} \\ \Delta i_{lq} \\ \Delta u_{od} \\ \Delta u_{oq} \\ \Delta i_{od} \\ \Delta i_{oq} \end{bmatrix} + B_{p\omega} \Delta \omega_{com} \quad (33-3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta u_{od}^* \\ \Delta u_{oq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{p\omega} \\ C_{pu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (34-3)$$

در معادلات (33-3) و (34-3) عبارات Δu_{od}^* , Δi_{odq} , Δu_{odq} و ولتاژهای

محور d و q خروجی و جریان های محور d و q سلفِ فیلترِ خروجی اینورتر می باشند و ماتریس

های ضرایب در روابط (33-3) و (34-3) عبارتند از :

$$A_p = \begin{bmatrix} \cdot & -m' & \cdot \\ \cdot & -\omega_c & \cdot \\ \cdot & \cdot & -\omega_c \end{bmatrix} \quad B_{p\omega} = \begin{bmatrix} -1 \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \omega_c I_{od} & \omega_c I_{oq} & \omega_c I_{od} & \omega_c I_{oq} \\ \cdot & \cdot & \omega_c I_{oq} & \omega_c I_{od} & \omega_c I_{oq} & \omega_c I_{od} \end{bmatrix} \quad C_{p\omega} = [\cdot \quad -m' \quad \cdot]$$

$$C_{pu} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & -K_q \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

۲-۲-۴-۳ مدل سیگنال کوچک کنترل کننده ولتاژ و جریان

بر اساس طراحی حلقه کنترلی معادلات ریاضی حلقه کنترلی ولتاژ را می توان به صورت زیر

نوشت [۴۱]:

$$\begin{cases} i_{id}^* = i_{od} - \omega C_f u_{oq}^* + K_{up}(u_{od}^* - u_{od}) + K_{ui} \int (u_{od}^* - u_{od}) dt \\ i_{iq}^* = i_{oq} - \omega C_f u_{od}^* + K_{up}(u_{oq}^* - u_{oq}) + K_{ui} \int (u_{oq}^* - u_{oq}) dt \end{cases} \quad (۳۵-۳)$$

که در معادلات K_{up} و K_{ui} به ترتیب ضرایب کنترل کننده تناسبی-انتگرالی در حلقه کنترلی ولتاژ می باشند و u_{od}^* و u_{oq}^* مقادیر مرجع ولتاژ d و q می باشند. در معادلات حلقه کنترلی ولتاژ، ولتاژها را بر اساس شار سلف می نویسیم زیرا شار سلفها به عنوان یکی دیگر از متغیرهای حالت می باشد:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_d}{dt} = u_{od}^* - u_{od} \\ \frac{d\varphi_q}{dt} = u_{oq}^* - u_{oq} \end{cases} \quad (۳۶-۳)$$

با جایگذاری معادله (۳۶-۳) در معادله (۳۵-۳) معادلات شکل حلقه کنترلی ولتاژ به دست

آورده می شوند که به صورت زیر می باشند [۴۱]:

$$\begin{cases} i_{id}^* = i_{od} - \omega C_f u_{oq}^* + K_{up} \left(\frac{d\varphi_d}{dt} \right) + K_{ui} \int \left(\frac{d\varphi_d}{dt} \right) dt \\ i_{iq}^* = i_{oq} - \omega C_f u_{od}^* + K_{up} \left(\frac{d\varphi_q}{dt} \right) + K_{ui} \int \left(\frac{d\varphi_q}{dt} \right) dt \end{cases} \quad (۳۷-۳)$$

که شکل فضای حالت مدل سیگنال کوچک در فضای حالت به شکل $\dot{x} = Ax + BU$ ، به

ترتیب معادلات (۳۸-۳) و (۳۹-۳) می باشند.

$$\Delta \dot{\varphi}_{dq} = [^\circ] \Delta \varphi_{dq} + B_{u1} \Delta u_{odq}^* + B_{u2} \begin{bmatrix} \Delta i_{dq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (۳۸-۳)$$

$$\Delta i_{ldq}^* = C_u \Delta \varphi_{dq} + D_{u\gamma} \Delta u_{odq}^* + D_{u\gamma} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (3-39)$$

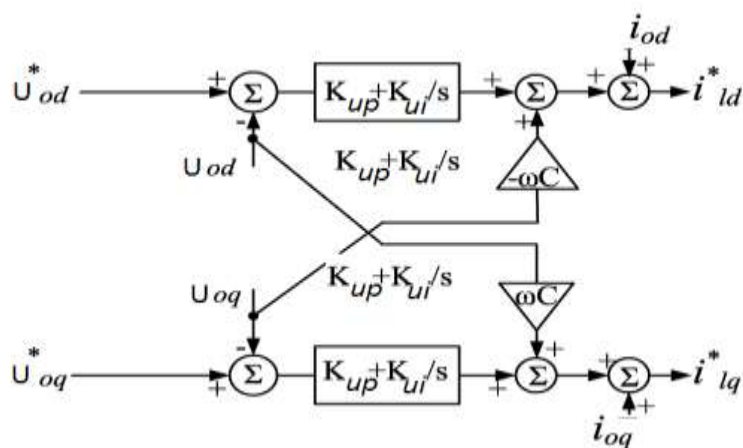
که ماتریس ضرایب در معادلات فوق عبارتند از :

$$B_{u\gamma} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad B_{u\gamma} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & -\cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & -\cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

$$C_u = \begin{bmatrix} K_{ui} & \cdot \\ \cdot & K_{ui} \end{bmatrix} \quad D_{u\gamma} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & K_{up} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & -K_{up} & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

$$D_{u\gamma} = \begin{bmatrix} K_{up} & -\omega C_f \\ \omega C_f & K_{up} \end{bmatrix}$$

در شکل (3-8) به طور کامل دیاگرام کنترل ولتاژ نمایش داده شده است.



شکل (3-7) - دیاگرام کنترل ولتاژ [41]

در معادله سیگنال کوچک کنترل ولتاژ ورودی های سیستم به دو قسمت تقسیم شده اند که عبارتند از ورودی های اعمالی از طریق فیدبک و ورودی های مرجع که در شکل (3-8) کاملاً مشخص می باشند.

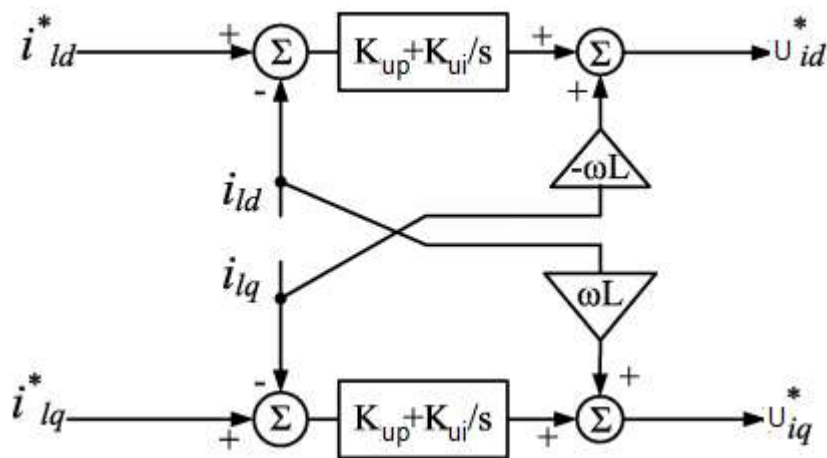
ساختار کنترل کننده جریان اینورتر مستقل از شبکه که در شکل (3-9) آمده است برای

فیلتر جریان اینورتر از یک کنترلر PI استاندارد استفاده شده است. همانند کنترلر ولتاژ در این قسمت

نیز از تغییر متغیر استفاده می کنیم و متغیرهای حالت این قسمت عبارتند از [۴۱]:

$$\begin{cases} u_{id}^* = i_{od} - \omega C_f u_{oq}^* + K_{up}(u_{od}^* - u_{od}) + K_{ui} \int (u_{od}^* - u_{od}) dt \\ i_{iq}^* = i_{oq} - \omega C_f u_{od}^* + K_{up}(u_{oq}^* - u_{oq}) + K_{ui} \int (u_{oq}^* - u_{oq}) dt \end{cases} \quad (40-3)$$

$$\begin{cases} \frac{d\gamma_d}{dt} = i_{id}^* - i_{id} \\ \frac{d\gamma_q}{dt} = i_{iq}^* - i_{iq} \end{cases} \quad (41-3)$$



شکل (۸-۳) - دیاگرام کنترل جریان [۴۱]

با توجه به متغیرهای حالت و دیاگرام کنترل جریان مدل فضای برای این کنترل کننده به

صورت زیر می باشد [۴۱]:

$$\Delta \dot{\gamma}_{dq} = [\cdot] \Delta \gamma_{dq} + B_{i1} \Delta i_{dq}^* + B_{i2} \begin{bmatrix} \Delta i_{dq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (42-3)$$

$$\Delta u_{idq} = C_i \Delta \gamma_{dq} + D_{i1} \Delta i_{dq}^* + D_{i2} \begin{bmatrix} \Delta i_{dq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} \quad (43-3)$$

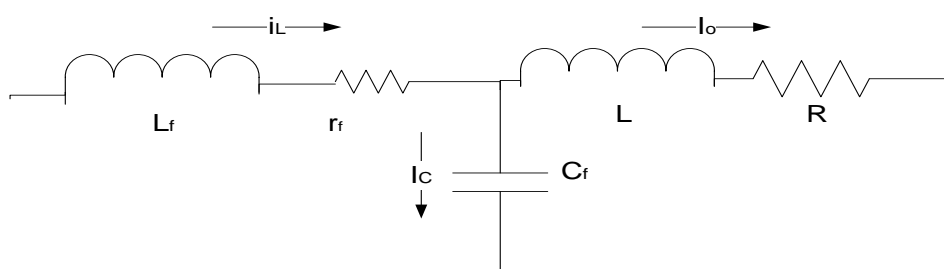
که ضرایب به کار رفته در معادلات فوق به شرح زیر می باشند:

$$B_{i\gamma} = \begin{bmatrix} -1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & -1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad B_{i\lambda} = \begin{bmatrix} 1 & \cdot \\ \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad C_i = \begin{bmatrix} K_{ui} & \cdot \\ \cdot & K_{ui} \end{bmatrix}$$

$$D_{i\gamma} = \begin{bmatrix} -K & -\omega L_f & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \omega L_f & -K & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad B_{i\lambda} = \begin{bmatrix} K_{up} & \cdot \\ \cdot & K_{up} \end{bmatrix}$$

۳-۲-۴-۳ معادلات سیگنال کوچک فیلتر خروجی و شبکه

در خروجی اینورترها به دلیل بالا بودن فرکانس سویچینگ هارمونیک های ولتاژ و دیده می شوند به همین دلیل برای از بین بردن هارمونیک های فرکانس بالا نیاز به فیلتر احساس می شود. مکان قرار گرفتن فیلتر قبل از اتصال اینورتر به بار باشد. در عمل انواع فیلتر های مختلف وجود دارد که انتخاب فیلتر بستگی به نوع سیستم دارد. مدل فیلتر مورد استفاده در سیستم مورد مطالعه در شکل (۳-۱۰) مشاهده می شود. در ریز شبکه توان خروجی اینورترها به وسیله فیلتر LC به باس AC تزریق می شود. اگر معادلات دیفرانسیل برای فیلتر LC نوشته شود خواهیم داشت :



شکل (۳-۹) - مدل فیلتر خروجی اینورتر

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{ld}}{dt} = u_{id} - u_{od} - R_f i_{ld} + \omega L_f i_{lq} \\ L_f \frac{di_{lq}}{dt} = u_{iq} - u_{oq} - R_f i_{lq} + \omega L_f i_{ld} \\ C_f \frac{du_{od}}{dt} = i_{ld} - i_{od} + \omega C_f u_{oq} \\ C_f \frac{du_{oq}}{dt} = i_{lq} - i_{oq} + \omega C_f u_{od} \\ L_f \frac{di_{od}}{dt} = u_{od} - u_{cd} - R i_{od} + \omega L i_{oq} \\ L_f \frac{di_{oq}}{dt} = u_{oq} - u_{cq} - R i_{oq} + \omega L i_{od} \end{cases} \quad (۳-۴۴)$$

در معادلات فوق L_f سلف فیلتر، C_f خازن فیلتر، i_l جریان سلف فیلتر، u_o ولتاژ خروجی اینورتر، i_o جریان خروجی، R_f مقاومت میرا کننده فیلتر، L و R مقاومت و اندوکتانس خط و u_{cd}, u_{cq} ولتاژهای باس AC می باشند. برای خطی سازی رابطه (۳-۴۴) و به دست آوردن شکل سیگنال کوچک معادلات فیلتر و شبکه ω_o به عنوان مقدار اولیه نقطه کار فرکانس زاویه ای در نظر گرفته شده است. با ساده سازی رابطه (۳-۴۴) برای فیلتر و شبکه به شکل سیگنال در فضای حالت به شکل $\dot{x} = Ax + BU$ به صورت رابطه (۳-۴۵) به دست خواهد آمد :

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} = A_{LW} \begin{bmatrix} \Delta i_{ldq} \\ \Delta u_{odq} \\ \Delta i_{odq} \end{bmatrix} + B_{LW} \Delta u_{ldq} + C_{LW} \Delta u_{cdq} + D_{LW} \Delta \omega \quad (۳-۴۵)$$

که در رابطه فوق ماتریس های ضرایب عبارتند از :

$$A_{LW} = \begin{bmatrix} \frac{-R_f}{l_f} & \omega. & \frac{-1}{l_f} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \omega. & \frac{-R_f}{l_f} & \cdot & \frac{-1}{l_f} & \cdot & \cdot \\ \frac{1}{C_f} & \cdot & \cdot & \omega. & \frac{-1}{C_f} & \cdot \\ \cdot & \frac{1}{C_f} & \omega. & \cdot & \cdot & \omega. \\ \cdot & \cdot & \frac{-1}{L} & \cdot & \frac{-R}{L} & \omega. \\ \cdot & \cdot & \cdot & \frac{-1}{l_f} & \omega. & \frac{-R}{L} \end{bmatrix}$$

$$B_{LW} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & \cdot \\ \cdot & \frac{1}{L_f} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad C_{LW} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & \cdot \\ \cdot & \frac{1}{L_f} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

$$D_{LW} = [I_{lq} \quad -I_{ld} \quad U_{oq} \quad -U_{od} \quad I_{oq} \quad -I_{od}]^T$$

۴-۲-۴-۳ معادله سیگنال کوچک کلی اینورتر

تا این مرحله معادلات سیگنال کوچک تمامی قسمت های یک اینورتر به تنهایی به دست آورده شد. همه معادلاتی محاسبه شده در قاب مرجع d-q می باشند. اکنون برای به دست آوردن معادله سیگنال کوچک کل سیستم همانطور که قبل از این نیز گفته شده است نیاز است یک اینورتر به عنوان مرجع قرار داده شود و بقیه اینورتر ها این قاب مرجع منتقل شوند. برای این منظور با توجه به توضیحاتی که در قسمت ۱-۴-۳ توضیح داده شده است برای جریان خروجی اینورتر به صورت زیر می توان نوشت [۴۱]:

$$i_{oDQ} = T i_{dq} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} i_{odq} \quad (۴۶-۳)$$

معادله (۴۶-۳) را می توان به صورت زیر ساده کرد:

$$T i_{dq} = T_i \Delta \theta \quad (۴۷-۳)$$

که در رابطه فوق

$$T_i = \begin{bmatrix} -I_{od} \sin \theta - I_{oq} \cos \theta \\ I_{od} \cos \theta - I_{oq} \sin \theta \end{bmatrix} \quad (۴۸-۳)$$

در ریز شبکه ولتاژ باس AC در قاب مرجع اینورتر رفرنس می باشد حال برای به دست آوردن ولتاژ در قاب مرجع d-q برای هر اینورتر باید از تبدیل معکوس استفاده شود که رابطه (۴۹-۳) و (۵۰-۳) بیان کننده این موضوع می باشند.

$$u_{cdq} = T^{-1} u_{CDQ} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} u_{CDQ} \quad (۴۹-۳)$$

با خطی سازی رابطه (۳-۴۹) خواهیم داشت :

$$\Delta u_{cdq} = T^{-1} \Delta u_{CDQ} + T_u^{-1} \Delta \theta \quad (۳-۵۰)$$

که در معادله فوق T_u^{-1} برابر می باشد با :

$$T_u^{-1} = \begin{bmatrix} -U_{CD} \sin \theta + U_{CQ} \cos \theta \\ -U_{od} \cos \theta - U_{CQ} \sin \theta \end{bmatrix} \quad (۳-۵۱)$$

حال با در نظر گرفتن معادلات (۳-۲۰) الی (۳-۵۱) می توان معادله سیگنال کوچک در

فضای حالت برای اینورتر X را به صورت ماتریسی به شکل زیر بدست آورد:

$$\Delta \dot{X}_{invx} = A_{invx} \Delta X_{invx} + B_{invx} \Delta u_{CDQ} + B_{x\omega com} \Delta \omega_{com}$$

(۳-۵۲)

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_x \\ \Delta i_{oDQx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{inv\omega x} \\ C_{invcx} \end{bmatrix} \Delta X_{invx}$$

بردار متغیر های حالت ΔX_{invx} و که ضرایب در معادله فوق عبارتند از :

$$\Delta X_{invx} [\Delta \theta_x \quad \Delta P_x \quad \Delta Q_x \quad \Delta \varphi_{dqx} \quad \Delta \gamma_{dqx} \quad \Delta i_{ldqx} \quad \Delta u_{odqx} \quad \Delta i_{odqx}]^T$$

که به ترتیب در معادله فوق $\Delta \theta_x$ متغیر حالت زاویه اینورتر α نسبت به اینورتر مرجع می

باشد و ΔP_x ، ΔQ_x به ترتیب توان اکتیو و راکتیو اینورتر α و $\Delta \gamma_{dqx}$ ، $\Delta \varphi_{dqx}$ متغیر های حالت

مربوط به فیلتر خروجی می باشند و Δi_{ldqx} جریان خط و Δu_{odqx} ، Δi_{odqx} جریان و ولتاژ

خروجی هستند.

$$A_{invx} \begin{bmatrix} A_{p(r^*r)} \\ (B_{u1}C_{pu})_{r^*r} \\ (B_{il}D_{ul}C_{pu})_{r^*r} \\ \left\{ \begin{array}{l} B_{LW}D_{il}D_{ul}C_{pu} + \\ C_{LW}[T_u^{-1} \cdot_{r^*1} \cdot_{r^*1}] \\ + D_{LW}C_{p\omega} \end{array} \right\}_{r^*r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cdot_{r^*r} \\ \cdot_{r^*r} \\ (B_{il}C_u)_{r^*r} \\ (B_{LW}D_{il}C_u)_{r^*r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cdot_{r^*r} \\ \cdot_{r^*r} \\ \cdot_{r^*r} \\ (B_{LW}C_i)_{r^*r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{p(r^*r)} \\ B_{u2(r^*r)} \\ (B_{il}D_{ur} + B_{ir})_{r^*r} \\ \left(\begin{array}{l} A_{LW} + B_{LW}D_{il}D_{ur} \\ + B_{LW}D_{ir} \end{array} \right)_{r^*r} \end{bmatrix}_{(1r^*1r)} \quad (13*13)$$

$$B_{invx} = \begin{bmatrix} \cdot_{r^*r} \\ \cdot_{r^*r} \\ \cdot_{r^*r} \\ (C_{LW}T^{-1})_{r^*r} \end{bmatrix}_{(1r^*r)} \quad B_{xwcom} = \begin{bmatrix} (B_{pw})_{r^*1} \\ \cdot_{r^*1} \\ \cdot_{r^*1} \\ \cdot_{r^*1} \end{bmatrix}_{(1r^*1)}$$

$$C_{inv\omega x} = [(X_{p\omega})_{1r^*} \quad \cdot_{1r^*} \quad \cdot_{1r^*} \quad \cdot_{1r^*}]_{(1*1r)}$$

$$C_{invx} = [[T_{i(r^*1)} \quad \cdot_{r^*r}]_{r^*r} \quad \cdot_{r^*r} \quad [0_{r^*r} \quad T_{r^*r}]]_{(r^*1r)}$$

$$X_{p\omega} = \begin{cases} [\cdot & -m' & \cdot] \\ [\cdot & \cdot & \cdot] \end{cases} \quad \begin{matrix} x = 1 \\ x \neq 1 \end{matrix}$$

مدل فوق برای هر تعداد اینورتر قابل استفاده است. در این پایان نامه ریز شبکه مورد مطالعه

با دو اینورتر در نظر گرفته شده است. حال با فرض ۲ اینورتر ادامه روابط نوشته خواهند شد.

تا این قسمت از مدل سازی برای هر اینورتر مدل سیگنال کوچک در فضای حالت به دست

آمده است. با ترکیب معادلات فوق برای دو اینورتر خواهیم داشت :

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{inv1} \\ \Delta X_{inv2} \end{bmatrix} = A_{inv} \begin{bmatrix} \Delta X_{inv1} \\ \Delta X_{inv2} \end{bmatrix} + B_{inv} \Delta u_{CDQ} \quad (53-3)$$

$$\Delta i_{oDQ} = C_{inv} \begin{bmatrix} \Delta X_{inv1} \\ \Delta X_{inv2} \end{bmatrix}$$

که ماتریس های ضرایب فوق عبارتند از :

$$A_{inv} = \begin{bmatrix} (A_{inv1} + B_{\omega com} C_{inv\omega1}) & \circ_{13*13} \\ (B_{\omega cm} C_{inv\omega1}) & (A_{inv2})_{(26*26)} \end{bmatrix}$$

$$B_{inv} = \begin{bmatrix} B_{inv1} \\ B_{inv2} \end{bmatrix} \quad C_{inv} = \begin{bmatrix} C_{invc1} & \circ_{2*13} \\ \circ_{2*13} & C_{invc2} \end{bmatrix}$$

با به دست آوردن مدل سیگنال کوچک در فضای حالت ریز شبکه تنها نیاز به مدل سیگنال

کوچک بار ریز شبکه مستقل از شبکه می باشد. در قسمت بعد به این مهم پرداخته شده است.

۳-۴-۳ مدل سازی سیگنال کوچک بار

در سیستم مورد بررسی و بر اساس جریان بار (i_{load}) می توان معادلات دیفرانسیل بار را در

شکل (۲-۳) به صورت زیر نوشت [۴۱]:

$$L_{load} \frac{di_{loadD}}{dt} = u_{CD} - R_{load} i_{loadD} + \omega L_{load} i_{loadQ} \quad (54-3)$$

$$L_{load} \frac{di_{loadQ}}{dt} = u_{CQ} - R_{load} i_{loadQ} + \omega L_{load} i_{loadD} \quad (55-3)$$

در معادله فوق L_{load} و R_{load} به ترتیب نندوکتانس و مقاومت بار می باشند. با خطی

سازی معادلات (۵۴-۳) و (۵۵-۳) می توان به معادله سیگنال کوچک بار در فضای حالت دست یافت

که عبارت است از:

$$\Delta i_{loadDQ} = A_{load} \Delta i_{loadDQ} + B_{load1} \Delta u_{CDQ} + B_{load2} \Delta \omega \quad (56-3)$$

که در معادله فوق ضرایب به صورت زیر می باشند:

$$A_{load} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{load}}{L_{load}} & \omega. \\ \omega. & \frac{-R_{load}}{L_{load}} \end{bmatrix} \quad B_{load2} = \begin{bmatrix} I_{loadQ} \\ -I_{loadD} \end{bmatrix}$$

$$B_{load\ 1} = \begin{bmatrix} 1 & \cdot \\ \frac{1}{L_{load}} & \\ \cdot & \\ & \frac{1}{L_{load}} \end{bmatrix}$$

در این قسمت آخرین بخش از معادلات سیگنال کوچک ریز شبکه در فضای حالت به دست آورده شد و در قسمت آخر به مدل کلی سیستم پرداخته می شود.

۳-۴-۴ مدل سیگنال کوچک نهایی ریز شبکه

همانور که در بخش های این فصل توضیح داده شده است پله به پله مدل ریز شبکه استخراج شده است و در فضای حالت به دست آمده اند. حال با ترکیب همه قسمت های ریز شبکه به یک مدل نهایی برای بررسی ریز شبکه دست یافته خواهد شد. یکی از تفاوت های مدل ارایه شده در این پایان نامه با مدل های مشابه این موضوع می باشد که در مدل نهایی ریز شبکه فرض شده است که همه اینورترها به باس AC متصل شده اند و خط ارتباطی دیگری میان اینورترها موجود نمی باشد که این موضوع در شکل (۳-۲) کاملاً مشخص می باشد. این فرض باعث می شود که ماتریس A نهایی سیستم در عین کامل بودن و در بر داشتن همه قسمت های مهم ریز شبکه، ساده تر شود.

در مدل ریز شبکه های مستقل از شبکه برای بهبود ولتاژ باس AC فرض می شود که باس AC توسط یک مقاومت بسیار بزرگ به زمین متصل است که در اصطلاح به آن مقاومت مجازی گفته می شود. در مدل لحاظ شده در این پژوهش نیز مقاومت مجازی (r_n) در نظر گرفته شده است که با این فرض ولتاژ باس AC برابر خواهد بود با [۴۴]:

$$\begin{cases} u_{CD} = r_n(i_{oD1} + i_{oD2} - i_{loadD}) \\ u_{CQ} = r_n(i_{oQ1} + i_{oQ2} - i_{loadQ}) \end{cases} \quad (۵۷-۳)$$

با خطی سازی معادله (۵۸-۳) خواهیم داشت :

$$\Delta u_{CDQ} = R_N M_{inv} \begin{bmatrix} \Delta i_{oD} \\ \Delta i_{oQ} \end{bmatrix} + R_N M_{load} \begin{bmatrix} \Delta i_{loadD} \\ \Delta i_{loadQ} \end{bmatrix} \quad (59-3)$$

که ماتریس های ضرایب در معادله (59-3) از قرار زیر می باشند :

$$R_N = \begin{bmatrix} r_n & \dot{} \\ \cdot & r_n \end{bmatrix} \quad M_{inv} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad M_{load} = \begin{bmatrix} -1 & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

حال با در نظر گرفتن معادلات (53-3)، (56-3) و (59-3) و ساده سازی متغیر های واسطه

در نهایت مدل سیگنال کوچک در فضای حالت کل سیستم ریز شبکه جزیره ای نمایش داده شده در

شکل (3-2) به صورت زیر به دست خواهد آمد.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_{inv} \\ \Delta \dot{i}_{load} \end{bmatrix} = A_{sys} \begin{bmatrix} \Delta X_{inv} \\ \Delta i_{loadDQ} \end{bmatrix}$$

که در معادله فوق $\Delta X_{inv} = [\Delta X_{inv1} \quad \Delta X_{inv2}]^T$ و ماتریس ضرایب برابر خواهد بود با :

$$A_{sys} = \begin{bmatrix} (A_{inv} + B_{inv} R_N M_{inv} C_{inv}) & (B_{inv} R_N M_{load}) \\ (B_{load1} R_N M_{inv} C_{inv} + B_{load2} C_{inv\omega}) & (A_{inv} + B_{load1} R_N M_{load}) \end{bmatrix}$$

و همچنین برای ΔX_{invx} برابر است با :

$$\Delta X_{invx} = [\Delta \theta_x \quad \Delta P_x \quad \Delta Q_x \quad \Delta \varphi_{dqx} \quad \Delta \gamma_{dqx} \quad \Delta i_{ldqx} \quad \Delta u_{odqx} \quad \Delta i_{odqx}]^T$$

مدل به دست آمده جهت بررسی پایداری ریز شبکه نشان داده شده در شکل (3-2) می

باشد. با استفاده از مدل فوق تحلیل مقادیر ویژه بر روی ریز شبکه انجام می شود.

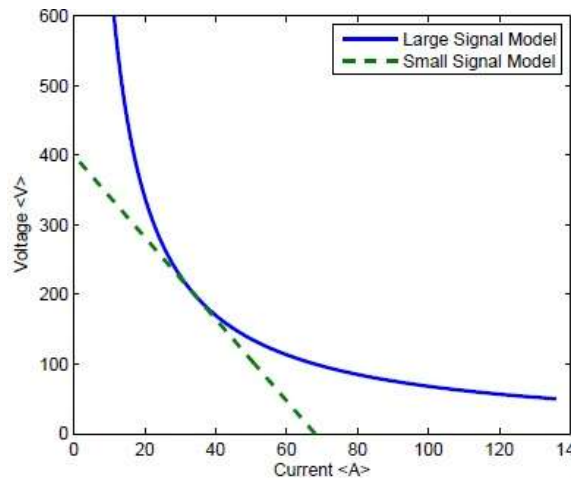
3-5 مدل بار با توان ثابت

در ریز شبکه ها علاوه بر بار رایج سلفی - مقاومتی بارهای دیگر نیز می تواند وجود داشته

باشد. ادوات الکترونیک قدرت در سیستم های قدرت همانند بار توان ثابت عمل می کنند. به دلیل

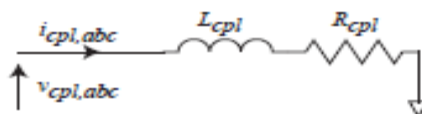
وجود این ادوات الکترونیک قدرت در ریز شبکه های مبتنی بر اینورتر، مطالعه رفتار بارهای توان ثابت

در ریز شبکه ها اهمیت پیدا میکند. در این پایان نامه تلاش شده است تا با استفاده از مدل سازی ریز شبکه پیشنهاد شده، همراه با بار توان ثابت به بررسی تاثیر بار توان ثابت در ریز شبکه ها پرداخته شود که یکی از نوآوری های این پایان نامه نیز می باشد. از این رو در این بخش به مدل سازی بار توان ثابت پرداخته می شود تا با به دست آوردن معادل سیگنال کوچک بار توان ثابت به بررسی رفتار این مدل بار پرداخته شود. رفتار بار توان ثابت را می توان در شکل (۳-۱۰) مشاهده کرد.



شکل (۳-۱۰) - رفتار بار توان ثابت

همان گونه که در شکل مشاهده می شود، برای به دست آوردن مدل سیگنال کوچک بار توان ثابت می توان از تقریب خطی استفاده کرد. در بار های توان ثابت با افزایش جریان، ولتاژ کاهش می یابد و بالعکس، به عبارت دیگر می توان گفت که بار توان ثابت مانند یک امپدانس منفی در سیستم عمل می کند که ممکن است عامل ناپایداری در سیستم شود. بار توان ثابت در مدار های الکتریکی به صورت امپدانس و مقاومت سری نمایش داده می شود. (شکل ۳-۱۱) مدل سیگنال کوچک بار توان ثابت را می توان به صورت زیر به دست آورد [۵۴]-[۵۰]:



شکل (۳-۱۱) - مدل بار توان ثابت

بر اساس مدل فوق می توان نوشت :

$$\frac{di_{cpl}}{dt} = \frac{-R_{cpl}}{L_{cpl}} i_{cpl} + \frac{1}{L_{cpl}} v_g \quad (60-3)$$

$$-R_{cpl} = \frac{v_g}{P_{cpl}} \quad \text{که در رابطه فوق :}$$

که R_{cpl} و L_{cpl} به ترتیب نشان دهنده مقاومت و سلف در نظر گرفته شده برای بار با توان ثابت می باشند.

با خطی سازی رابطه فوق خواهیم داشت :

$$\frac{d\Delta i_{cplD}}{dt} = \frac{-R_{cpl}}{L_{cpl}} \Delta i_{cplD} + \omega \cdot i_{cplQ} + \frac{1}{L_{cpl}} \Delta v_{dD} + I_{cplQ} \Delta \omega_{com} \quad (61-3)$$

$$\frac{d\Delta i_{cplQ}}{dt} = \frac{-R_{cpl}}{L_{cpl}} \Delta i_{cplQ} + \omega \cdot i_{cplD} + \frac{1}{L_{cpl}} \Delta v_{dQ} + I_{cplD} \Delta \omega_{com} \quad (62-3)$$

و در نهایت مدل سیگنال کوچک فضای حالت بار توان ثابت را خواهیم داشت :

$$[\Delta \dot{i}_{cplQ}] = A_{cpl} \begin{bmatrix} \Delta i_{cplD} \\ \Delta i_{cplQ} \end{bmatrix} + B_{cpl1} \begin{bmatrix} \Delta v_{dD} \\ \Delta v_{dQ} \end{bmatrix} + B_{cpl2} [\Delta \omega_{com}] \quad (63-3)$$

که در رابطه فوق ضرایب عبارتند از :

$$A_{cpl} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{cpl}}{L_{cpl}} & \omega \cdot \\ \omega \cdot & \frac{-R_{cpl}}{L_{cpl}} \end{bmatrix} \quad B_{cpl1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{cpl}} & \cdot \\ \cdot & \frac{1}{L_{cpl}} \end{bmatrix} \quad B_{cpl2} = \begin{bmatrix} I_{cplQ} \\ I_{cplD} \end{bmatrix}$$

با استفاده از مدل بار توان ثابت و جایگذاری در مدل ریز شبکه به جای قسمت بار می توان

به مدل ریز شبکه مستقل از شبکه با بار توان ثابت دست یافت که ماتریس A سیستم در این حالت برابر است با :

$$A_{sys-cpl} = \begin{bmatrix} (A_{inv} + B_{inv}R_N M_{inv}C_{inv}) & (B_{inv}R_N M_{load}) \\ (B_{cpl}R_N M_{inv}C_{inv} + B_{cpl}C_{inv}\omega) & (A_{inv} + B_{cpl}R_N M_{load}) \end{bmatrix} \quad (64-3)$$

با استفاده از رابطه (64-3) می توان به مطالعه بر روی رفتار مقادیر ویژه ریز شبکه جزیره ای با بار توان ثابت پرداخت و با آنالیز مقادیر ویژه سیستم، پایداری سیگنال کوچک سیستم را مورد مطالعه قرار داد.

۳-۶ روش آنالیز حساسیت مقادیر ویژه سیستم برای تحلیل سیگنال کوچک ریز شبکه ها

در فصل گذشته در قسمت ۲-۳ روش آنالیز حساسیت مقادیر ویژه نسبت به یک مولفه ماتریس A سیستم بیان شد. در این قسمت با توجه به این که ضرایب دروپ (K_p, K_q) در چندین آرایه از ماتریس A به دست آمده برای سیستم مورد بررسی تاثیر دارند به بیان روشی برای نشان دادن حساسیت مقادیر ویژه نسبت به ضرایب دروپ پرداخته می شود.

همان گونه که در معادله (۲-۱۶) نشان داده شد حساسیت نسبت به یک آرایه ماتریس A به صورت زیر محاسبه می شود :

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} = \Psi_{iK} \Phi_{ji}$$

حال با در نظر گرفتن این موضوع که ماتریس A می تواند تابعی از یک پارامتر دلخواه مانند k باشد که k می تواند هر پارامتر دلخواه مانند ضرایب دروپ باشد، می توان نوشت :

$$A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i$$

$$\frac{\partial A}{\partial k}\Phi_i + A\frac{\partial\Phi_i}{\partial k} = \frac{\partial\lambda_i}{\partial k}\Phi_i + \lambda_i\frac{\partial\Phi_i}{\partial k} \quad (65-3)$$

در رابطه فوق از سمت چپ طرفین را بردار ویژه چپ (Ψ_i) سیستم ضرب می کنیم :

$$\Psi_i\frac{\partial A}{\partial k}\Phi_i + \Psi_i A\frac{\partial\Phi_i}{\partial k} = \Psi_i\frac{\partial\lambda_i}{\partial k}\Phi_i + \Psi_i\lambda_i\frac{\partial\Phi_i}{\partial k} \quad (66-3)$$

با در نظر گرفتن $\Psi_i\Phi_i = 1$ و همچنین $\Psi_i(A - \lambda_i I) = 0$ و ساده سازی رابطه فوق نتیجه

به صورت رابطه (67-3) خواهد شد.

$$\frac{\partial\lambda_i}{\partial k}_{(1 \times 1)} = \Psi_{i, 1 \times n} \frac{\partial A}{\partial k}_{n \times n} \Phi_{i, n \times 1} \quad (67-3)$$

ماتریس های نمایش داده شده در رابطه (67-3) را به صورت گسترده می توان به صورت زیر

نوشت :

$$[\Psi_{i1} \quad \dots \quad \Psi_{ij} \quad \dots \quad \Psi_{im} \quad \dots \quad \Psi_{in}]_{1 \times n} \times$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial a_{11}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{1j}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{1m}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{1n}}{\partial k} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial a_{j1}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{jj}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{jm}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{jn}}{\partial k} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial a_{i1}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{im}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{in}}{\partial k} & \dots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial a_{n1}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{nj}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{nm}}{\partial k} & \dots & \frac{\partial a_{nn}}{\partial k} \end{bmatrix}_{n \times n} \times \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \\ \vdots \\ \Phi_{ji} \\ \vdots \\ \Phi_{mi} \\ \vdots \\ \Phi_{ni} \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (68-3)$$

با انجام ضرب ماتریسی فوق خواهیم داشت :

$$\frac{\partial\lambda_i}{\partial k}_{(1 \times 1)} = \Psi_{i1} \frac{\partial a_{11}}{\partial k} \Phi_{1i} + \dots + \Psi_{ij} \frac{\partial a_{jj}}{\partial k} \Phi_{ji} + \dots + \Psi_{im} \frac{\partial a_{m}}{\partial k} \Phi_{mi} + \dots + \quad (69-3)$$

$$\Psi_{in} \frac{\partial a_{nn}}{\partial k} \Phi_{ni} + \dots + \Psi_{in} \frac{\partial a_{ni}}{\partial k} \Phi_{ni}$$

عبارت فوق حساسیت سیستم را نسبت به پارامتر k نمایش می دهد که به صورت خلاصه می

توان نوشت :

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial k_{(1 \times 1)}} = \sum_{r=1}^n \Psi_{ir} \frac{\partial a_{r1}}{\partial k} \Phi_{ri} + \dots + \sum_{r=1}^n \Psi_{ir} \frac{\partial a_{rj}}{\partial k} \Phi_{ri} + \dots + \sum_{r=1}^n \Psi_{ir} \frac{\partial a_{rk}}{\partial k} \Phi_{ri} + \dots + \sum_{r=1}^n \Psi_{ir} \frac{\partial a_{rm}}{\partial k} \Phi_{ri} + \dots + \sum_{r=1}^n \Psi_{ir} \frac{\partial a_{rn}}{\partial k} \Phi_{ri} \quad (70-3)$$

در نهایت خواهیم داشت :

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial k_{(1 \times 1)}} = \sum_{s=1}^n \sum_{r=1}^n \Psi_{ir} \frac{\partial a_{rs}}{\partial k} \Phi_{ri} \quad (71-3)$$

۳-۷ مراحل انجام کار

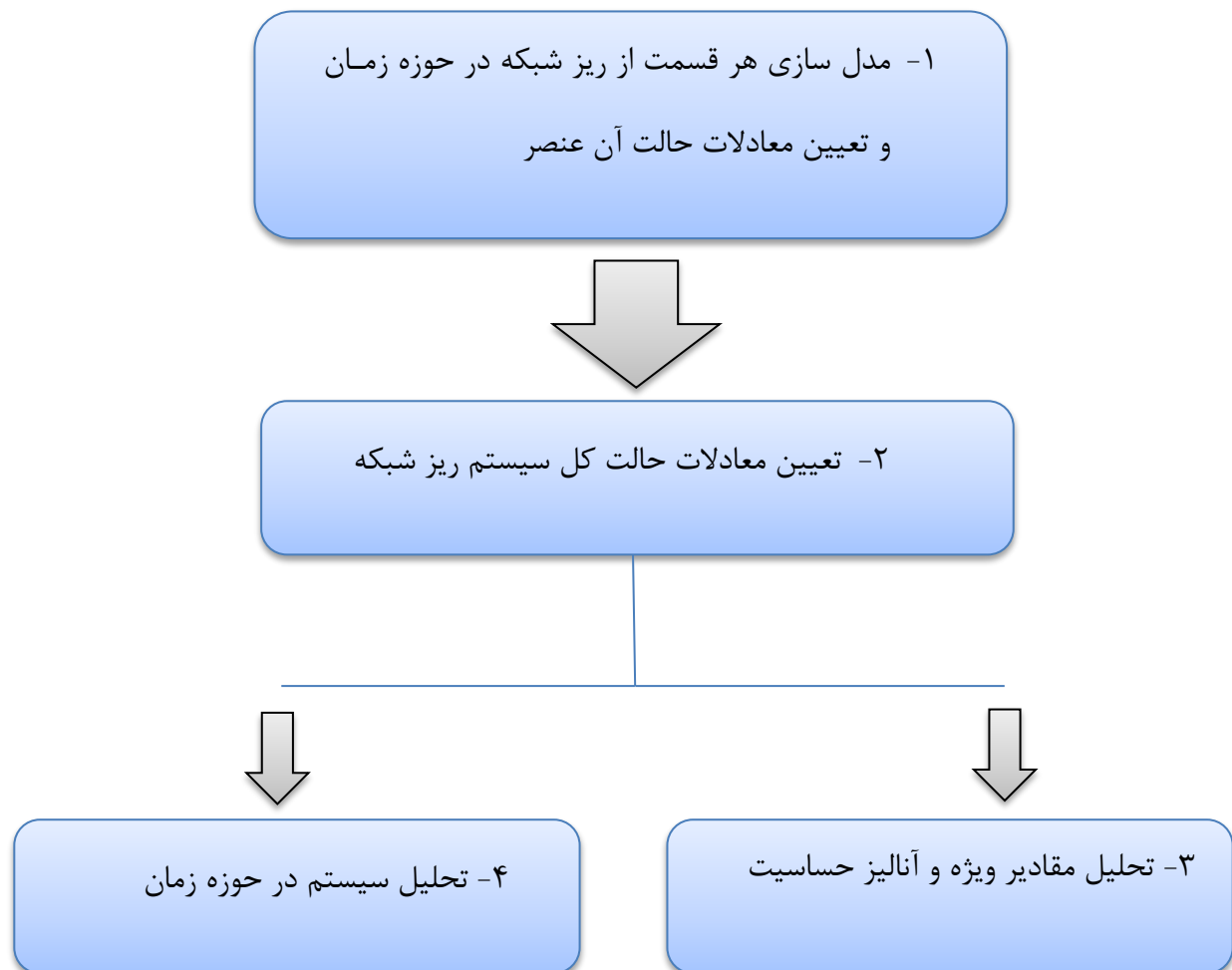
در شکل (۳-۱۳) مراحل اجرای کار در این پایان نامه تعیین شده است که مسیر طی شده در این

پایان نامه را نشان می دهد.

در قسمت ۱ از شکل (۳-۱۲) به این موضوع اشاره می کند که برای هر قسمت از ریز شبکه بر اساس معادلات ریاضی و قوانین الکتریکی یک مدل در فضای حالت به دست آورده شود که بتواند رفتار آن قسمت را به خوبی نمایش دهد. در قسمت ۲ از این شکل به ترکیب معادلات قسمت های مختلف سیستم پرداخته می شود که در نهایت به دست آوردن یک مدل نهایی برای ریز شبکه منجر می شود. قسمت های ۱ و ۲ در همین فصل انجام شده اند.

در سومین مرحله با استفاده از روش ریاضی ارایه شده برای تحلیل حساسیت مقادیر ویژه نسبت به ضرایب دروپ ، مقادیر حساسیت به دست آورده می شوند و سپس با استفاده از مدل فضای حالت ریز شبکه در فضای متلب به بررسی رفتار مقادیر ویژه سیستم تحت تاثیر تغییرات پارامتر های مختلف سیستم پرداخته می شود.

در آخرین قسمت پایان نامه بر اساس معادلات قسمت های مختلف ریز شبکه در محیط سیمولینک- متلب به بررسی رفتار ریز شبکه در حوزه زمان پرداخته می شود.



شکل (۳-۱۲)-مراحل انجام کار

۳-۸ جمع بندی

در این فصل قسمت های مختلف یک ریز شبکه در حالت جزیره ای مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر اساس مدل ریز شبکه معادلات سیگنال کوچک قسمت های مختلف آن به دست آورده شده است و با ترکیب معادلات قسمت های مختلف ریز شبکه مانند فیلتر خروجی، پارامترهای خط، معادلات بار و معادلات قسمت کنترل، یک مدل سیگنال کوچک در فضای حالت برای کل ریز شبکه به دست آورده شده است سپس روش آنالیز حساسیت مقادیر توضیح داده شده است. در این پایان نامه مدل ریز شبکه در دو حالت بار مقاومتی-سلفی و بار توان ثابت مورد بررسی قرار گرفته است و مدل ریز شبکه در هر دو حالت ارایه شده است.

فصل چهارم

شبیه سازی و نتایج

۱-۴ مقدمه

در این فصل از پایان نامه بر پایه مدل های نمایش داده شده در فصل قبل شبیه سازی را انجام و نتایج آن ارایه خواهد شد.

در این فصل ابتدا آنالیز حساسیت مقادیر ویژه برای ریز شبکه مستقل از شبکه انجام می شود سپس شبیه سازی در دو قسمت انجام خواهد شد که هر دو در محیط نرم افزار متلب می باشند. ابتدا مدل به دست آمده در فصل گذشته را با استفاده از کد نویسی در محیط متلب شبیه سازی کرده و با استفاده از آنالیز مقادیر ویژه سیستم، به بررسی نتایج و تاثیر عوامل مختلف بر پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه پرداخته خواهد شد هم چنین تاثیر بار توان ثابت بر روی پایداری سیگنال کوچک سیستم بررسی خواهد شد. سپس در محیط سیمولینک متلب مدل را پیاده سازی کرده و نتایج حاصل از شبیه سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. در هر مرحله سناریو های مختلفی در نظر گرفته شده است که از جوانب مختلف به موضوع پرداخته شده است.

۲-۴ سیستم مورد مطالعه

تا این قسمت ریز شبکه در حالت جزیره ای مدلسازی شده است و معادلات سیگنال کوچک در فضای حالت به دست آورده شده است. در پایداری سیگنال کوچک بررسی مقادیر ویژه یک روش بسیار مهم جهت آنالیز پایداری سیستم می باشد. اما تغییرات مقادیر مختلف پارامتر های سیستم مانند مقادیر ضرایب دروپ ولتاژ و جریان و پارامتر های خط بر پایداری تاثیر گزار است. در این بخش به بررسی تاثیر این مهم پرداخته شده است. سیستم مورد بررسی دارای و اینورتر موازی می باشد که یکی از اینورتر ها به عنوان مرجع قرار داده شده است و سایر اینورتر ها را هماهنگ می کند. ضرایب دروپ در این پژوهش برای هر دو اینورتر در حالت کار عادی سیستم مساوی قرار داده شده اند و دو اینورتر از نظر ساختار کنترلی با یکدیگر یکسان در نظر گرفته شده اند. مقادیر پارامتر های سیستم مورد بررسی در جدول ۱-۴ آورده شده اند.

جدول (۱-۴) - مقادیر پارامترهای ریز شبکه

واحد	مقدار	متغیرها
μf	۵۰	$C_{f1} = C_{f2}$
mH	۱,۳۵	$l_{f1} = l_{f2}$
mH	۳	$L_1 = L_2$
Ω	۰,۱	$R_1 = R_2$
mH	۱۰	L_{load}
Ω	۲۰	R_{load}
Rad/s	۳۱۴	ω_n
Rad/s.w	۰,۰۰۰۱	k_p
Rad/s	۰,۰۰۰۱	k_q
Rad/s	۳۱,۴	ω_c
degree	۱,۸	θ

در جدول ۲-۴ مقادیر نقطه کار پایدار ریز شبکه مستقل از شبکه مشاهده می شوند که در آن

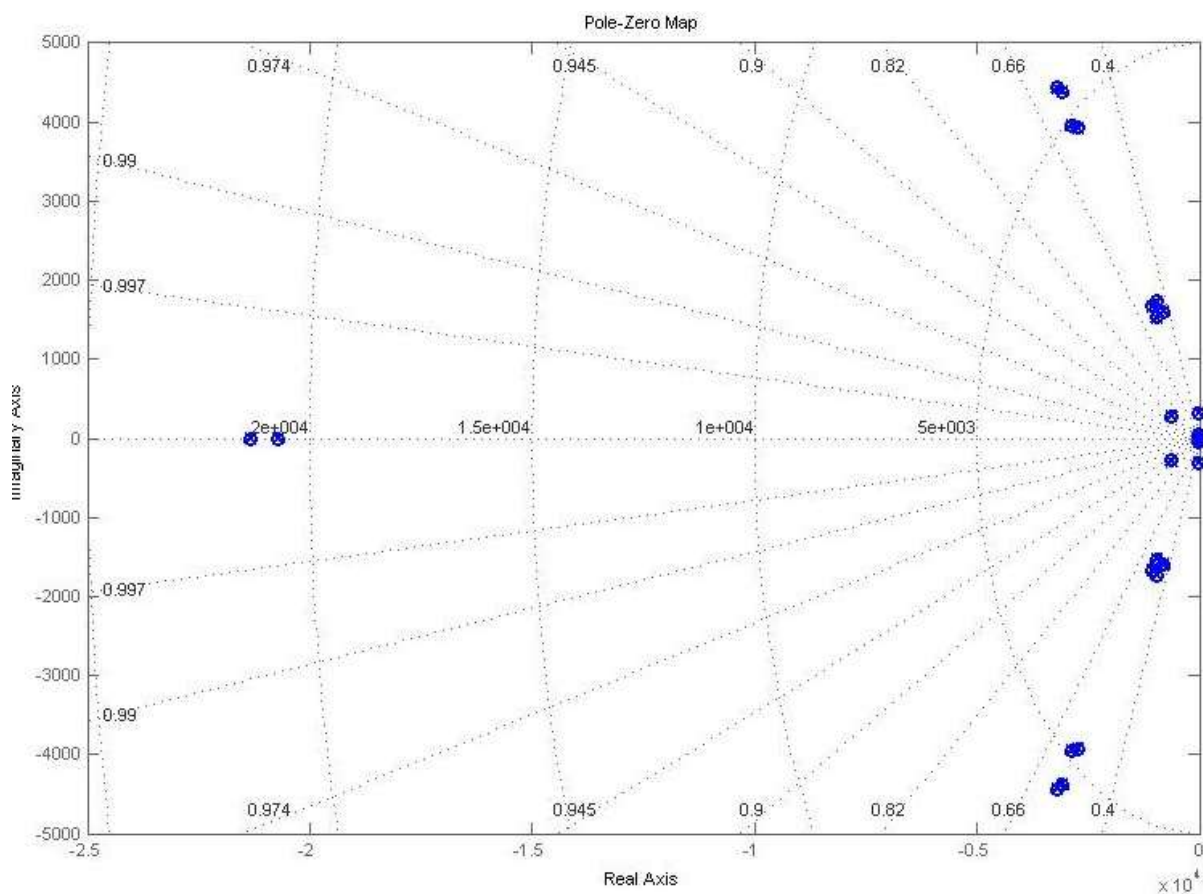
مقادیر اینورتر مرجع با شماره ۱ و مقادیر اینورتر دوم با شماره ۲ نمایش داده شده اند.

جدول (۲-۴) - مقادیر ولتاژ و جریان نقطه کار ریز شبکه

متغیرها	مقدار	واحد
U_{od1}	۳۱۱,۲	V
U_{od2}	۳۱۱,۲	V
U_{oq1}	۰	V
U_{oq2}	۰	V
I_{od1}	۳,۳	A
I_{od2}	۳,۳	A
I_{oq1}	۰,۴	A
I_{oq2}	۱,۲	A
I_{ld1}	۳,۵	A
I_{ld2}	۳,۵	A
I_{lq1}	۱,۵	A
I_{lq2}	۲,۳	A
U_{CD}	۳۱۰,۸	V
U_{CQ}	۰	V
I_{loadD}	۶,۶	A
I_{loadQ}	۵	A

۲-۴-۱ مکان اولیه مقادیر ویژه سیستم

در این پایان نامه روش بررسی پایداری سیگنال کوچک از بررسی رفتار مقادیر ویژه سیستم استخراج می شود از این سو ابتدا مکان اولیه مقادیر ویژه ریزش شبکه شکل (۲-۳) با پارامترهای مشخص شده در جدول (۱-۴) و (۲-۴) توسط شبیه سازی یه دست آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی که مقادیر ویژه سیستم می باشند در شکل (۱-۴) مشاهده می شود. همانگونه که از نتایج مشخص می باشد تمامی مقادیر ویژه سیستم در سمت چپ محور موهومی قرار گرفته اند و سیستم از نظر سیگنال کوچک پایدار می باشد. مقادیر ویژه سیستم با تغییر پارامترهای سیستم تغییر می کند و در این قسمت به بررسی تاثیر مقادیر پارامترهای مختلف از جمله ضرایب دروپ و خطوط و مقدار و نوع بار بر مقادیر ویژه ریزش شبکه پرداخته خواهد شد.



شکل ۱-۴- مکان اولیه مقادیر ویژه ریزش شبکه

جدول (۳-۴) - مقدار و مشخصات مقادیر ویژه اولیه ریز شبکه

ردیف	مقدار ویژه	میرایی	فرکانس (رادیان/ثانیه)	ردیف	مقدار ویژه	میرایی	فرکانس (رادیان/ثانیه)
۱	۰	-۱	۰	۱۳	$-۹۷۱+۱۵۳۰i$	۰/۵۳۶	۱۸۱۰
۲	$-۲۴/۹+۴/۳۲i$	۰/۹۸۵	۲۵/۲	۱۴	$-۹۷۱-۱۵۳۰i$	۰/۵۳۶	۱۸۱۰
۳	$-۲۴/۹-۴/۳۲i$	۰/۹۸۵	۲۵/۲	۱۵	$-۱۰۶۰+۱۶۷۰i$	۰/۵۳۷	۱۹۸۰
۴	$-۳۱/۴$	۱	۳۱/۴	۱۶	$-۱۰۶۰-۱۶۷۰i$	۰/۵۳۷	۱۹۸۰
۵	$-۱۲/۶+۴۴/۴i$	۰/۲۷۳	۴۶/۲	۱۷	$-۹۶۵+۱۷۳۰i$	۰/۴۸۷	۱۹۸۰
۶	$-۱۲/۶-۴۴/۴i$	۰/۲۷۳	۴۶/۲	۱۸	$-۹۶۵-۱۷۳۰i$	۰/۴۸۷	۱۹۸۰
۷	$-۱۷/۲+۳۱۴i$	۰/۰۵۴۷	۳۱۴	۱۹	$-۲۷۴۰+۳۹۳۰i$	۰/۵۷۲	۴۷۹۰
۸	$-۱۷/۲-۳۱۴i$	۰/۰۵۴۷	۳۱۴	۲۰	$-۲۷۴۰-۳۹۳۰i$	۰/۵۷۲	۴۷۹۰
۹	$۶۴۲+۲۸۰i$	۰/۹۱۷	۷۰۰	۲۱	$-۲۸۸۰+۳۹۵۰i$	۰/۵۸۹	۴۸۹۰
۱۰	$۶۴۲-۲۸۰i$	۰/۹۱۷	۷۰۰	۲۲	$-۲۸۸۰-۳۹۵۰i$	۰/۵۸۹	۴۸۹۰
۱۱	$-۸۰۹+۱۶۰۰i$	۰/۴۵۱	۱۷۹۰	۲۳	$-۳۰۸۰+۴۳۸۰i$	۰/۵۷۵	۵۳۵۰
۱۲	$-۸۰۹-۱۶۰۰i$	۰/۴۵۱	۱۹۰	۲۴	$-۳۰۸۰-۴۳۸۰i$	۰/۵۷۵	۵۳۵۰

ردیف	مقدار ویژه	میرایی	فرکانس (رادیان/ثانیه)	ردیف	مقدار ویژه	میرایی	فرکانس (رادیان/ثانیه)
۲۵	$-۳۲۱۰ + ۴۴۳۰i$	۰,۵۸۶	۵۴۷۰	۲۷	-۲۰۷۰۰	۱	۲۰۷۰۰
۲۶	$-۳۲۱۰ - ۴۴۳۰i$	۰,۵۸۶	۵۴۷۰	۲۸	-۲۰۱۳۰	۱	۲۰۱۳۰

همانطور که از مقادیر ویژه سیستم مشخص می باشد گروهی از مقادیر ویژه که نسبت به سایر مقادیر ویژه متمایل به سمت چپ می باشند و از مبدا فاصله زیادی دارند، تقریباً در پایداری سیستم تاثیر چندانی ندارند اما آن دسته از مقادیر ویژه که به مبدا نزدیک هستند با تغییرات پارامترهای سیستم می توانند سیستم را به سمت ناپایداری سوق دهند در پایداری سیستم نقش پررنگ تری ایفا می کنند. در ادامه به بررسی تغییرات پارامترهای مختلف ریز شبکه و تاثیر آن ها بر روی مقادیر ویژه ریز شبکه و پایداری سیستم پرداخته خواهد شد.

مقادیر میرایی و فرکانس برای هر مقدار ویژه بر اساس معادلات زیر که در قسمت (۲-۲-۱)

توضیح داده شده اند به دست می آیند :

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

به عنوان مثال برای مقدار ویژه پنجم خواهیم داشت :

$$\xi = \frac{۱۲/۶}{\sqrt{۱۲/۶^2 + ۴۴/۴^2}} = ۰/۲۷۳$$

$$f = \frac{۱۲/۶}{۲\pi} = ۴۶/۲$$

۳-۴ آنالیز حساسیت مقادیر ویژه سیستم

در این قسمت با توجه به روابط قسمت (۳-۶) به بررسی حساسیت سیستم به ضرایب دروپ پرداخته می شود. حساسیت تمامی مقادیر ویژه با توجه به ماتریس A سیستم نسبت به ضریب دروپ توان اکتیو (K_p) و ضریب دروپ توان راکتیو (K_q) در جدول (۴-۴) مشاهده می شود. رابطه حساسیت، مجدد در این قسمت مشاهده می شود.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial k_{(1 \times 1)}} = \sum_{s=1}^n \sum_{r=1}^n \Psi_{ir} \frac{\partial a_{rs}}{\partial k} \Phi_{ri}$$

از مقادیر حساسیت به دست آمده در جدول (۴-۴) می توان میزان تاثیر تغییرات ضرایب دروپ را بر روی مقادیر ویژه سیستم مقایسه کرد.

جدول ۴-۴ - حساسیت مقادیر ویژه نسبت به ضرایب دروپ

مقدار ویژه	حساسیت نسبت به K_p	حساسیت نسبت به K_q
λ_1	$1/5951+0i$	$0/019+0i$
λ_2	$1/5992+0i$	$0/008+0i$
λ_3	$35/5347-32/4475i$	$-31/8153-62/2136i$
λ_4	$35/5347+32/4475i$	$-31/8153+62/2136i$
λ_5	$41/1572-33/1773i$	$-34/8079-65/8035i$
λ_6	$41/1572+33/1773i$	$-34/8079+65/8035i$
λ_7	$36/6007-38/3257i$	$-28/3496-66/1361i$

λ_{λ}	$36/6 \cdot 0.7 + 3\lambda/3257i$	$-2\lambda/3496 + 66/1361i$
λ_{η}	$37/77 \cdot 1 - 3\lambda/2913i$	$-31/5279 + 69/6572i$
λ_{η}	$37/77 \cdot 1 + 3\lambda/2913i$	$-31/5279 - 69/6572i$
λ_{η_1}	$1/412 + 1\lambda/4714i$	$-14/1611 + 3/2871i$
λ_{η_2}	$1/412 - 1\lambda/4714i$	$-14/1611 - 3/2871i$
λ_{η_3}	$1/535\lambda + 3 \cdot 1/0.713i$	$-15/9 \cdot 19 - 9/1632i$
λ_{η_4}	$1/535\lambda + 3 \cdot 1/0.713i$	$-15/9 \cdot 19 + 9/1632i$
λ_{η_5}	$-1/1312 + 19/5495i$	$-1/1512 - 2/1451i$
λ_{η_6}	$-1/1312 - 19/5495i$	$-1/1512 + 2/1451i$
λ_{η_7}	$4/1 \cdot 12 + 22/1929i$	$-5/33 \cdot 4 - 1/7437i$
λ_{η_8}	$4/1 \cdot 12 - 22/1929i$	$-5/33 \cdot 4 + 1/7437i$
λ_{η_9}	$\cdot 3\lambda 51 + 1/1823i$	$-1/4 \cdot 39 + 0/3928$
$\lambda_{\eta_{10}}$	$\cdot 3\lambda 51 - 1/1823i$	$-1/4 \cdot 39 - 0/3928$
$\lambda_{\eta_{11}}$	$2/4\lambda 42 + 0,43\lambda 4i$	$-14/8 \cdot 95 - 12/712 \cdot i$
$\lambda_{\eta_{12}}$	$2/4\lambda 42 - 0,43\lambda 4i$	$-14/8 \cdot 95 + 12/712 \cdot i$
$\lambda_{\eta_{13}}$	$\cdot 555\lambda - 0/96 \cdot 1i$	$-9/237 \cdot 0 + 3/1247i$

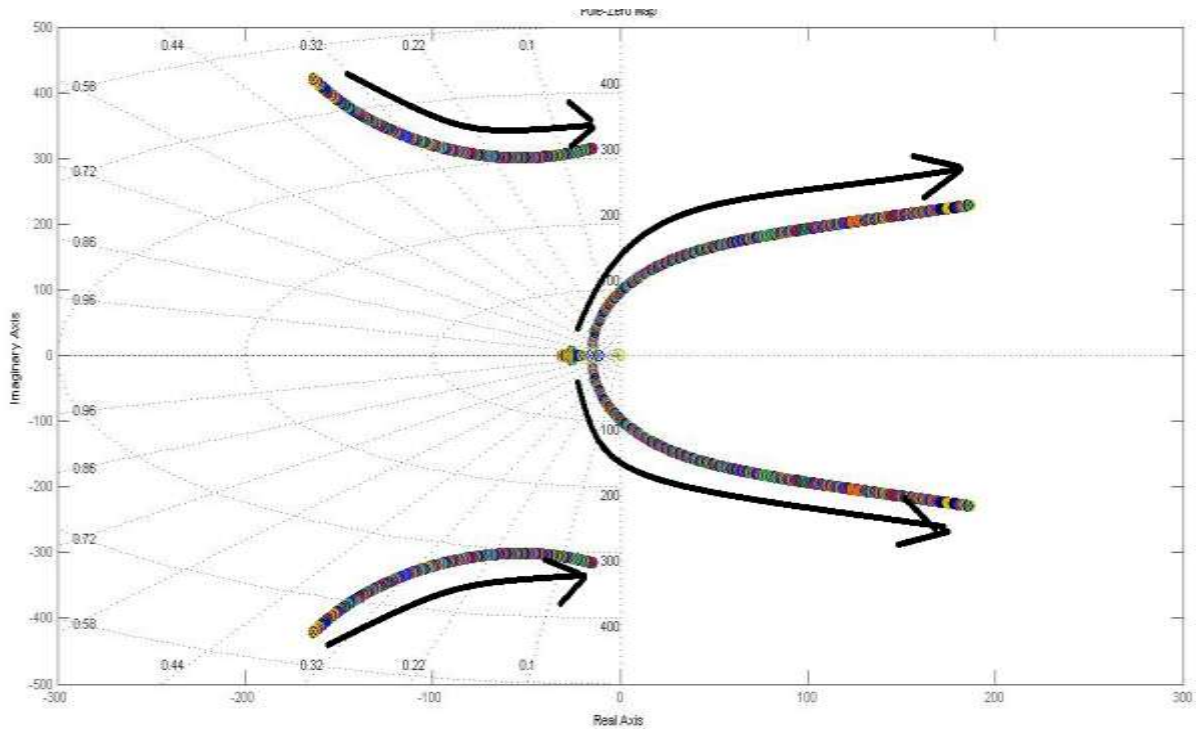
$\lambda_{۲۴}$	$۰/۵۵۵۸+۰/۹۶۰۱i$	$-۹/۲۳۷۰-۳/۱۲۴۷i$
$\lambda_{۲۵}$	$۰/۱۰۳۸+۰i$	\cdot
$\lambda_{۲۶}$	$۰/۰۰۹۱-۰/۰۰۲۵i$	\cdot
$\lambda_{۲۷}$	$۰/۰۰۹۱+۰/۰۰۲۵i$	\cdot
$\lambda_{۲۸}$	\cdot	\cdot

از جدول فوق این نتیجه برداشت می شود که در اکثر مقادیر ویژه، تاثیر ضریب دروپ توان

اکتیو بر مقادیر ویژه نسبت به ضریب دروپ توان راکتیو بیشتر می باشد.

۱-۳-۴ بررسی تغییرات ضریب دروپ توان اکتیو بر پایداری سیگنال کوچک

در این قسمت تاثیر ضریب دروپ توان اکتیو را بر پایداری سیگنال کوچک سیستم را بررسی خواهیم کرد. با تغییر ضریب دروپ توان اکتیو (K_p) در بازه $[۰/۰۰۰۱]$ تا $[۰/۱]$ و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها همانند می توان به تاثیر این پارامتر در پایداری سیستم پی برد. در شکل (۲-۴) تاثیر تغییرات دروپ توان اکتیو را بر پایداری سیستم مشخص می باشد.

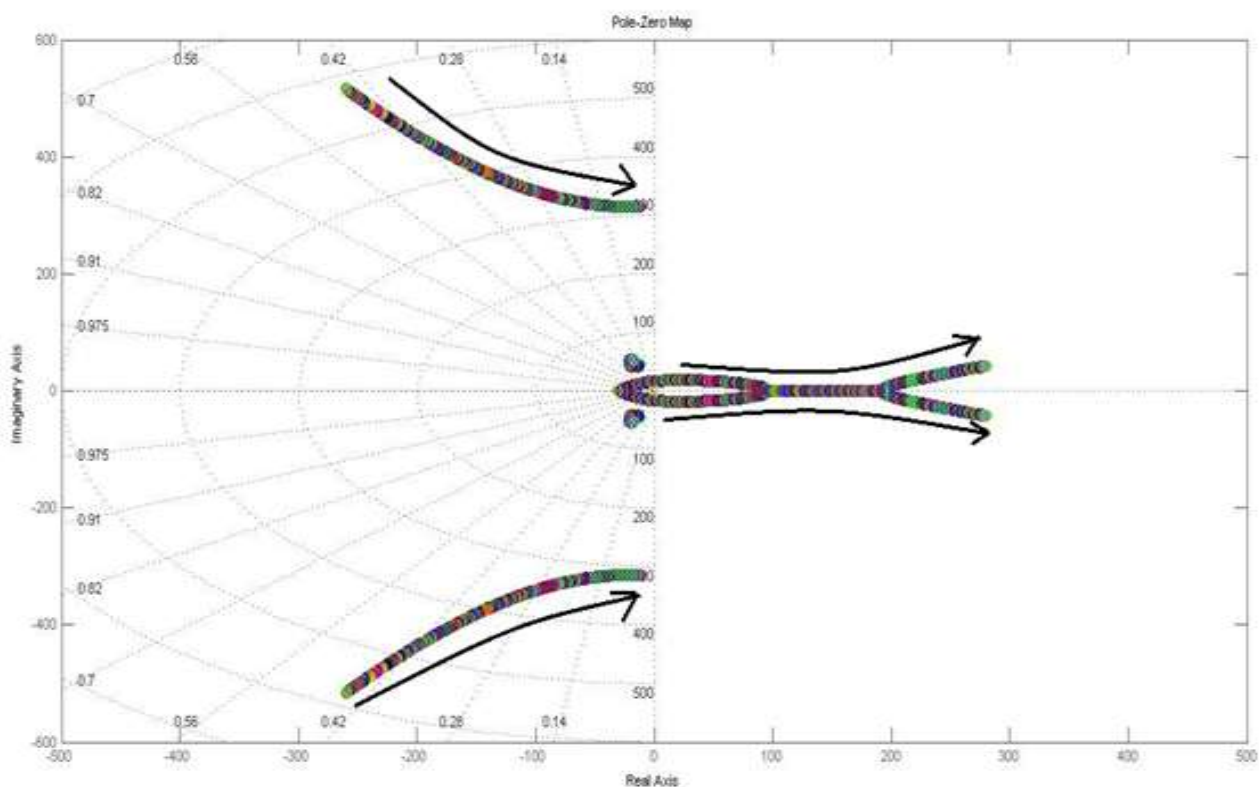


شکل (۴-۲) - بررسی تاثیر تغییرات ضریب دروپ توان اکتیو بر پایداری سیگنال کوچک سیستم

با توجه به روند تغییرات مقادیر ویژه سیستم که در شکل (۴-۲) مشاهده می شود، با افزایش ضریب دروپ توان اکتیو، دسته ای از مقادیر ویژه سیستم که به محور موهومی نزدیک می باشند شروع به افزایش کرده و با پیشروی و ورود به سمت راست محور موهومی باعث ناپایداری سیستم می شوند. تغییرات K_p بر سایر مقادیر ویژه به دلیل دور بودن از محور موهومی تاثیر نداشته چندانی نداشته است.

۴-۳-۲ بررسی تغییرات ضریب دروپ توان راکتیو بر پایداری سیگنال کوچک

سناریو بررسی تاثیر تغییرات ضریب دروپ توان راکتیو نیز مانند ضریب دروپ توان اکتیو با تغییرات K_q در بازه $[0/0001]$ تا $[0/1]$ و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها مورد بررسی قرار می گیرد.



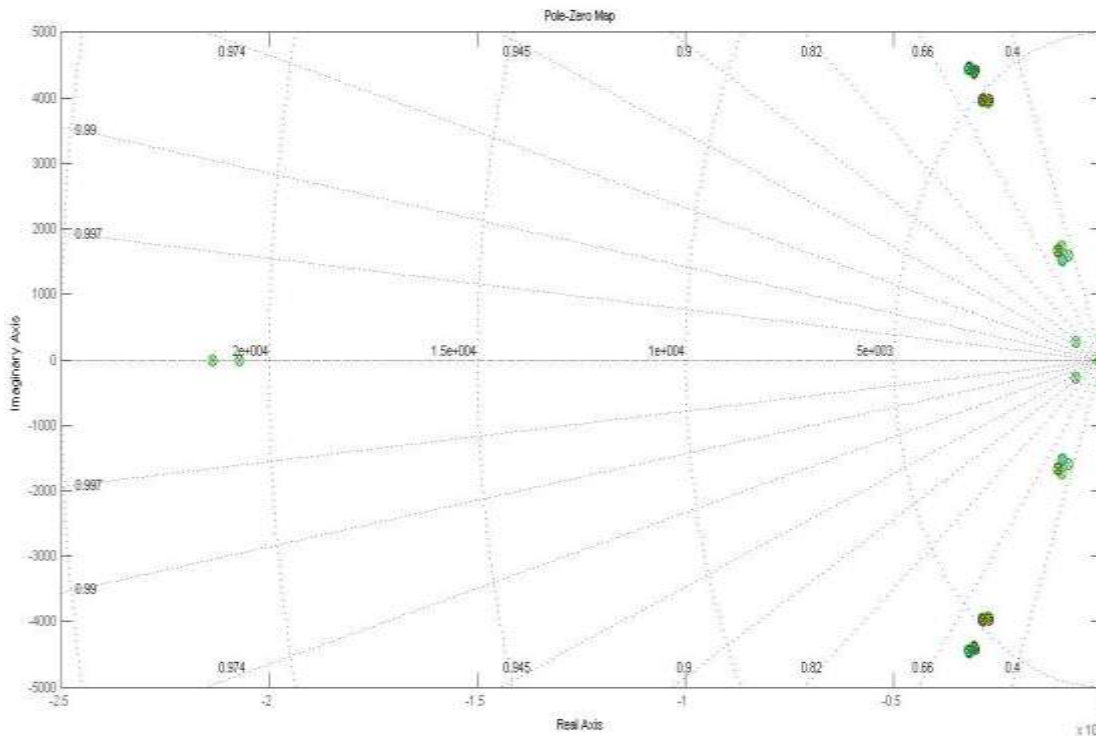
شکل (۳-۴) = بررسی تاثیر تغییرات ضریب دروپ توان راکتیو بر پایداری سیگنال کوچک سیستم

در این سناریو تاثیر تغییرات K_q بر مقادیر ویژه سیستم و همچنین بر پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه مشاهده می شود. همانطور که در شکل (۳-۴) مشاهده می شود، در این حالت با افزایش K_q مقادیر ویژه سیستم بر روی مسیری که در شکل (۳-۴) با پیکان مشخص شده اند حرکت می کنند و در این سناریو حرکت دو مقدار ویژه سیستم به سمت راست باعث ناپایداری ریز شبکه می شود. از مقایسه این سناریو با سناریو قبل می توان به این نتیجه رسید که تغییرات K_q نسبت به K_p سیستم را دیرتر ناپایدار می کند و بر پایداری ریز شبکه جزیره ای دارد.

۱-۲-۳-۴ بررسی تغییرات مقاومت خط بر پایداری سیگنال کوچک

در سیستم بررسی شده مقاومت های خطوط با R_1 و R_2 نمایش داده شده اند. در این سناریو به بررسی تاثیر کاهش مقاومت خط بر پایداری سیستم پرداخته خواهد شد و نتایج بررسی می شوند.

تغییرات مقاومت خطوط در بازه $[0/0001]$ تا $[0/1]$ بررسی خواهد شد و بقیه پارامتر های سیستم ثابت خواهند بود.

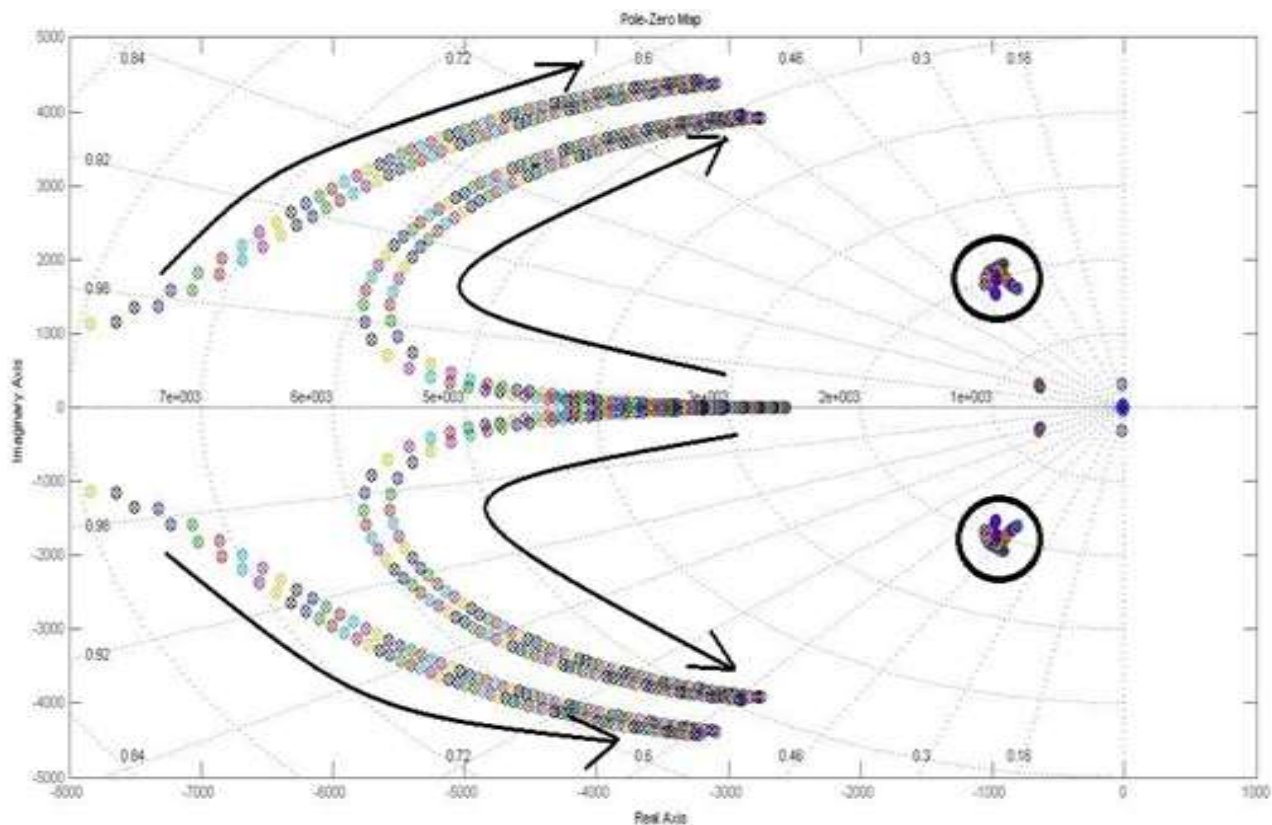


شکل (۴-۴) - بررسی تاثیر تغییرات مقاومت خطوط بر پایداری سیگنال کوچک سیستم

در شکل فوق کاملا واضح است که تغییرات مقاومت خط در بازه یاد شده تاثیر چشم گیری بر پایداری سیگنال کوچک سیستم ندارد و تنها در مقدار تعدادی از مقادیر ویژه تاثیر گذار می باشد که این مقادیر ویژه توانایی ناپایدار کردن سیستم را دارا نمی باشند.

۲-۲-۳-۴ بررسی تغییرات اندوکتانس خط بر پایداری سیگنال کوچک

تغییرات مقادیر اندوکتانس های خط نیز می تواند بر پایداری سیستم تاثیر گزار باشد از این در این قسمت به بررسی تاثیر تغییرات اندوکتانس های خطوط به پایداری سیستم پرداخته می شود. در این سناریو مقادیر L_1 و L_2 در سیستم مورد بررسی از 3 mH به 0.03 mH کاهش می یابد و نتایج تاثیر آن بر روی مقادیر ویژه سیستم نمایش داده می شود.



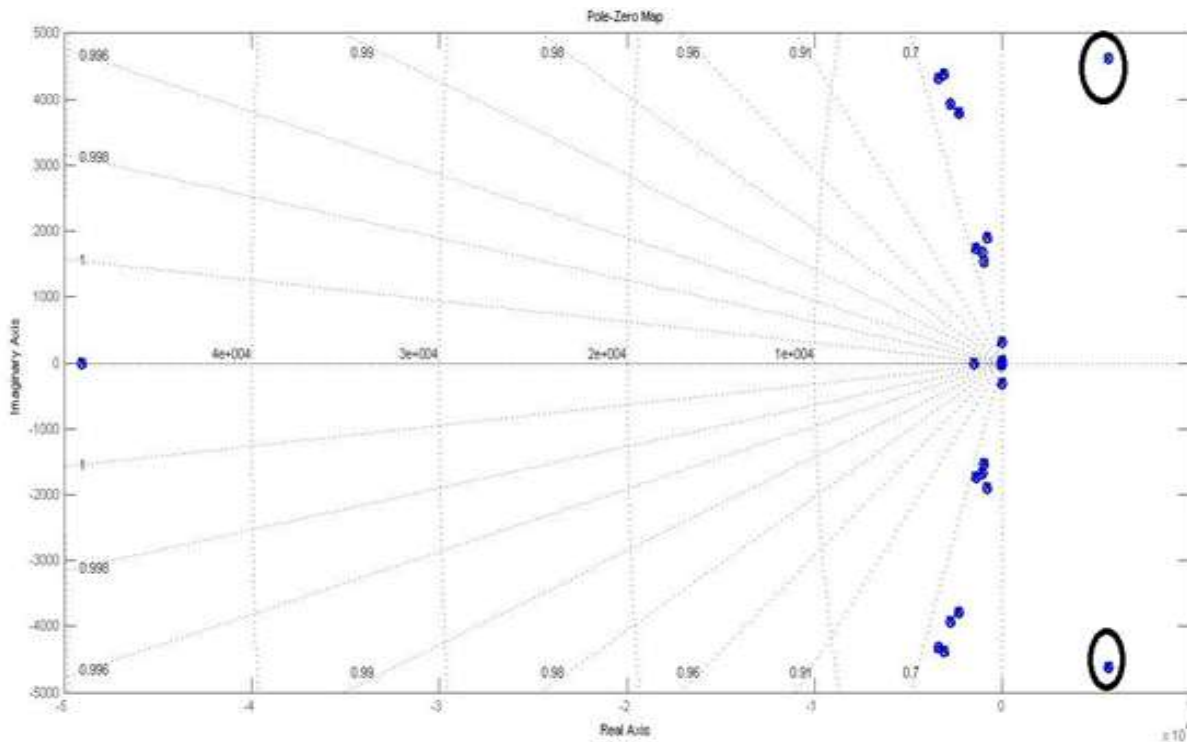
شکل (۴-۵) - بررسی تاثیر تغییرات اندوکتانس خط بر پایداری سیگنال کوچک

در شکل فوق همانگونه که مشاهده می شود با کاهش مقدار اندوکتانس خطوط مسیر حرکت مقادیر ویژه سیستم مشاهده می شود. گروهی از مقادیر ویژه به سمت راست حرکت کرده اما منجر به ناپایداری نشده است. می توان نتیجه گرفت در مدل ارایه شده در این پایان نامه تغییرات اندوکتانس در بازه تعریف شده سیستم را ناپایدار نمی کند.

۳-۳-۴ تاثیر بار توان ثابت در ریز شبکه

در فصل گذشته مدل ریز شبکه با بار توان ثابت به دست آورده شد. در این قسمت به بررسی تاثیر بار توان ثابت بر پایداری ریز شبکه پرداخته خواهد شد و نتایج بررسی می شوند. در این قسمت نیز یک بار توان ثابت که از نظر مقدار با بار در نظر گرفته شده سیستم مساوی است، جایگزین بار مقاومتی - سلفی در سیستم می شود و تاثیر آن بر مقادیر ویژه سیستم و در نهایت پایداری سیستم بررسی می شود. در نتایج شبیه سازی، همانطور که مشاهده می شود با جاگزینی بار توان ثابت در

سیستم مقادیر ویژه مشخص شده در شکل که به سمت راست محور موهومی حرکت کرده اند و سیستم از نظر سیگنال کوچک ناپایدار از نوع نوسانی شده است.



شکل (۴-۶) - بررسی تاثیر با توان ثابت بر پایداری سیگنال کوچک

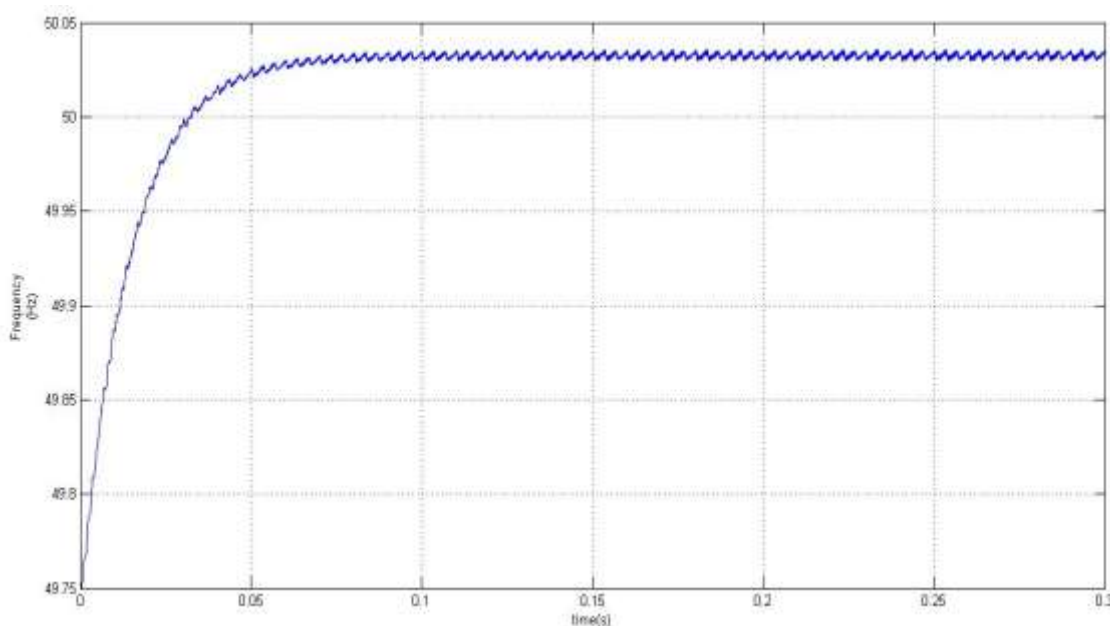
۴-۴ شبیه سازی رفتار سیستم در حوزه زمان

در این قسمت با توجه به معادلات سیستم به بررسی رفتار سیستم و شکل موج های سیستم در حوزه زمان پرداخته می شود. برای شبیه سازی در حوزه زمان معادلات سیستم در سیمولینک-متلب شبیه سازی شده است.

در این حالت نیز به بررسی سناریو های مختلفی خواهیم پرداخت و در هر سناریو نتایج را بررسی خواهیم کرد. تاثیر ضرایب دروپ را بر مقادیر ویژه سیستم بررسی کردیم حال در این سناریو به شبیه سازی و بررسی تاثیرات تغییرات ضرایب دروپ بر ولتاژ و جریان و فرکانس و توان های خروجی ریز شبکه خواهیم پرداخت .

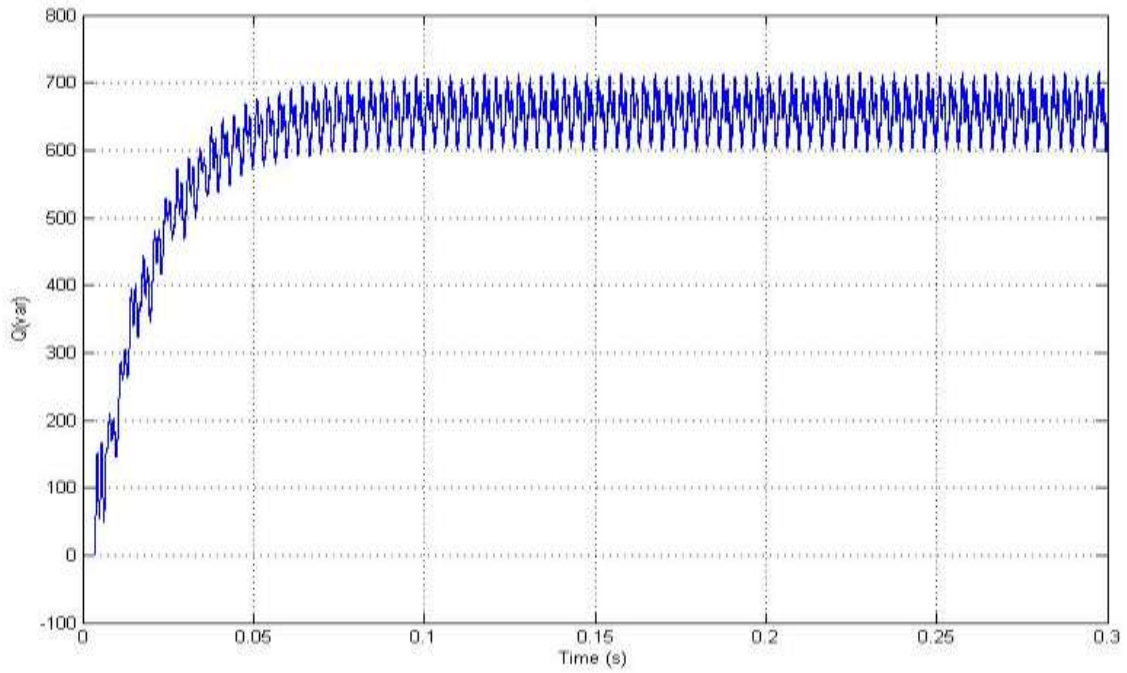
۴-۴-۱ فرکانس و ولتاژ خروجی سیستم

در اولین حالت برای هر دو اینورتر $K_p=K_q=0.0001$ خواهیم گرفت و شکل موج های خروجی سیستم به دست آورده می شوند. نتایج این سناریو به صورت زیر می باشد. فرکانس و سایر شکل موج های اینورترها در این سناریو به دلیل مساوی بودن تمامی پارامترهای آن ها با هم مساوی می باشد و از آوردن نتایج مشابه صرف نظر شده است.

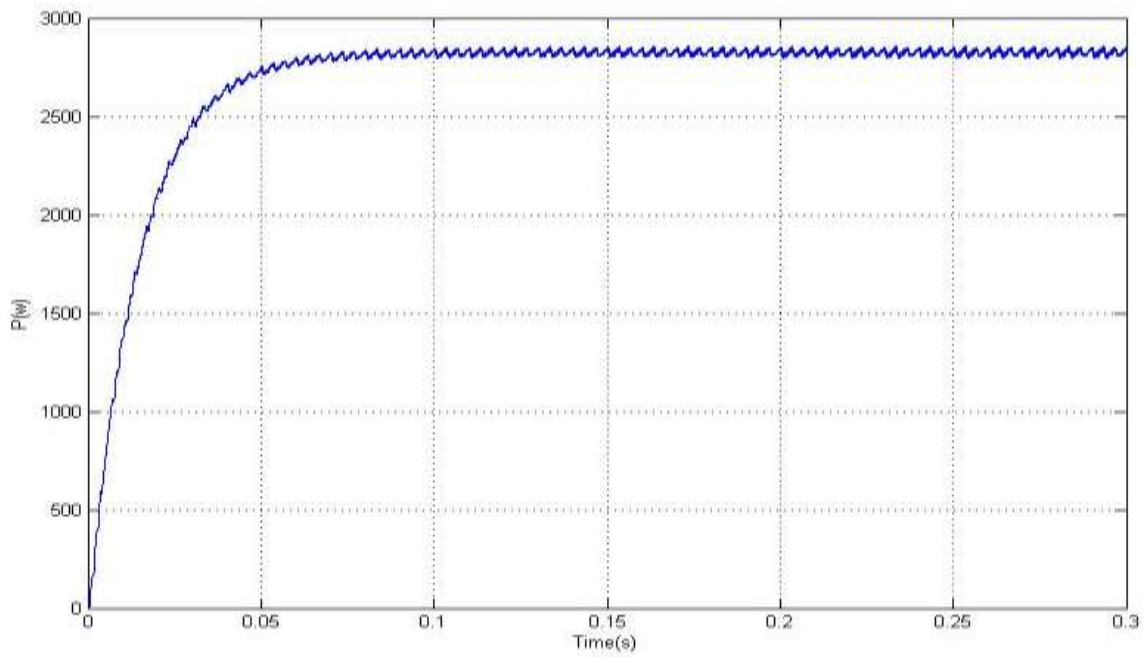


شکل (۷-۴) - فرکانس اینورترها به ازای $K_p=K_q=0.0001$

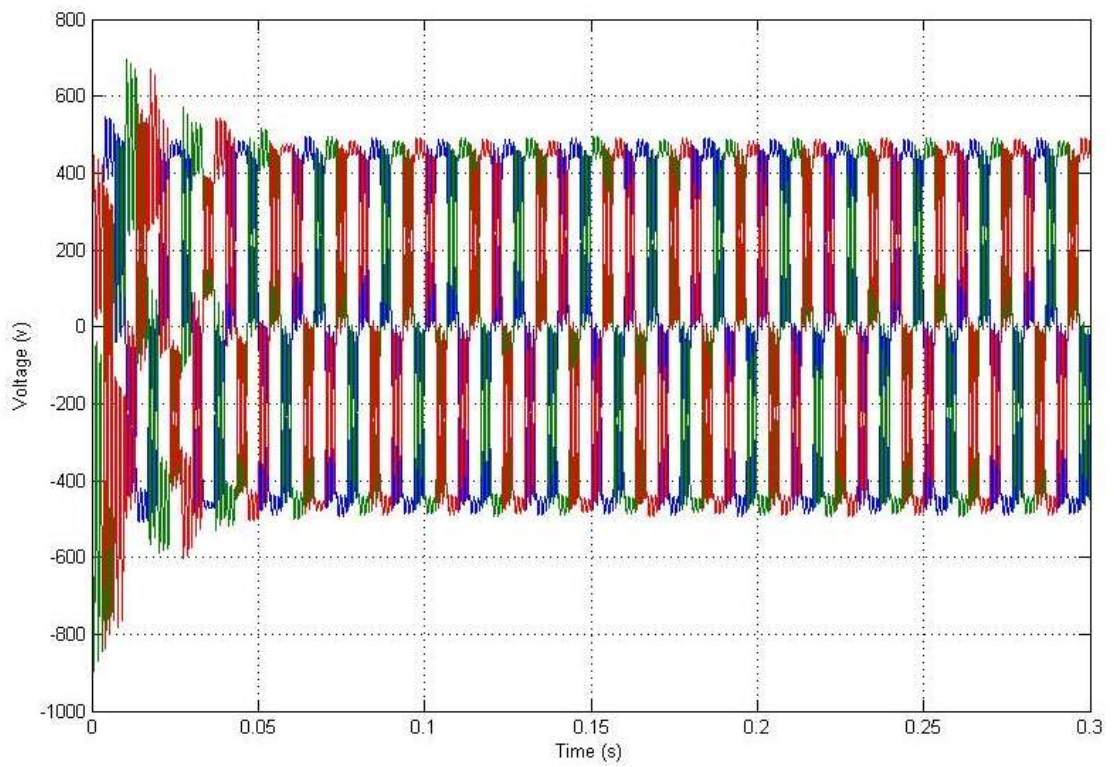
همان گونه که در شکل (۷-۴) مشاهده می شود، فرکانس اینورترها در نزدیکی مقدار مرجع ریز شبکه که ۵۰ هرتز می باشد تنظیم شده است که از نظر دقت قابل قبول می باشد. در ادامه سایر نتایج مشاهده می شوند.



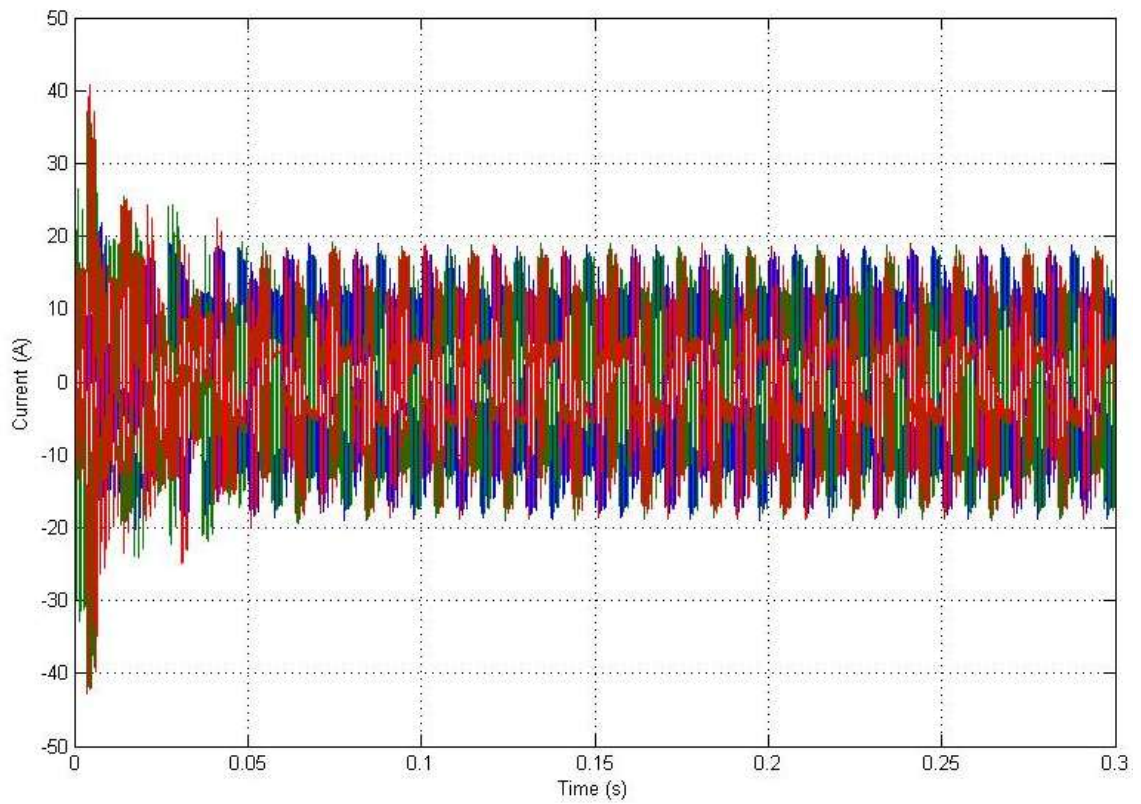
شکل (۸-۴) - توان راکتیو تولیدی اینورترها به ازای $K_p=K_q=0.0001$



شکل (۹-۴) - توان اکتیو تولیدی اینورترها به ازای $K_p=K_q=0.0001$



شکل (۱۰-۴) - شکل موج ولتاژ خروجی اینورترها به ازای $K_p=K_q=0.001$

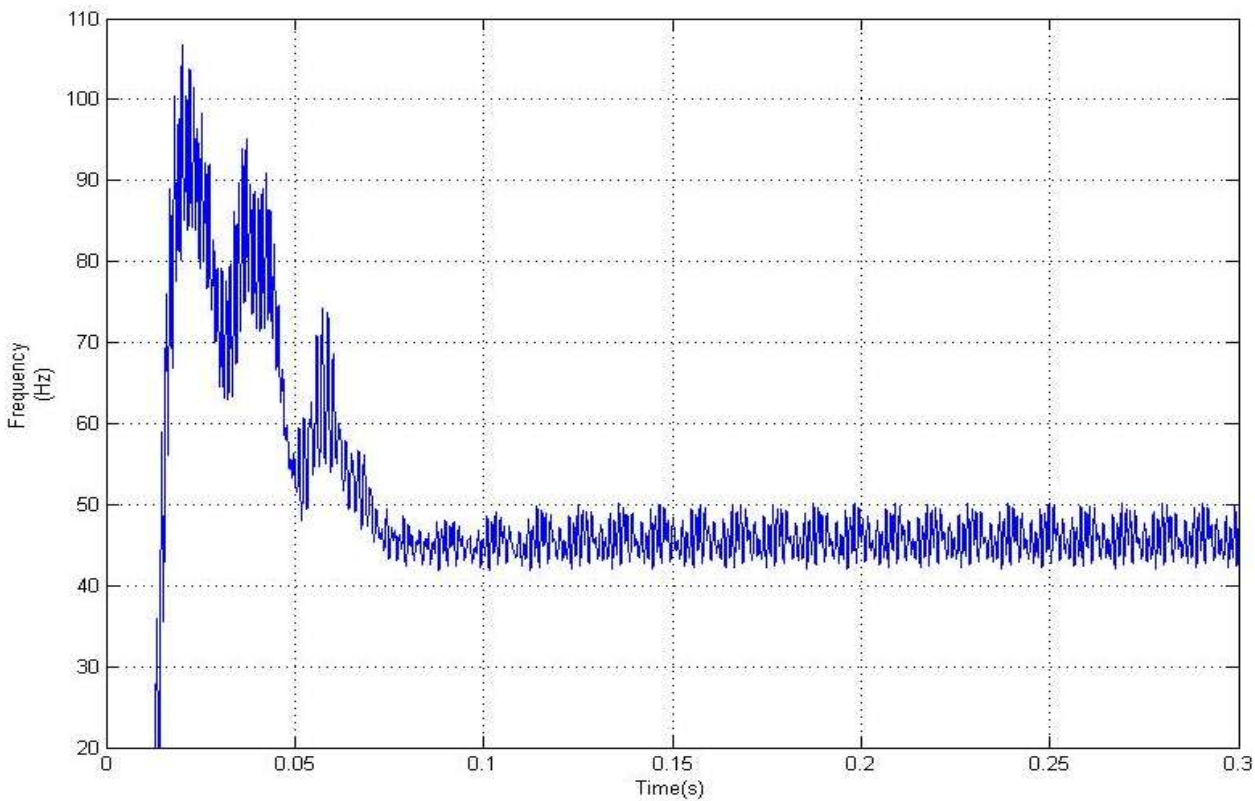


شکل (۱۱-۴) - شکل موج جریان خروجی اینورترها به ازای $K_p=K_q=0.001$

نتایج حاصل در این سناریو نمایانگر حالت عملکردی عادی ریز شبکه مورد بررسی در وضعیت جزیره ای را نشان می دهد و در سناریو های بعد به تاثیر تغییرات پارامتر های سیستم پرداخته خواهد شد و با مقایسه نتایج با این سناریو، تحلیل نتایج صورت می گیرد.

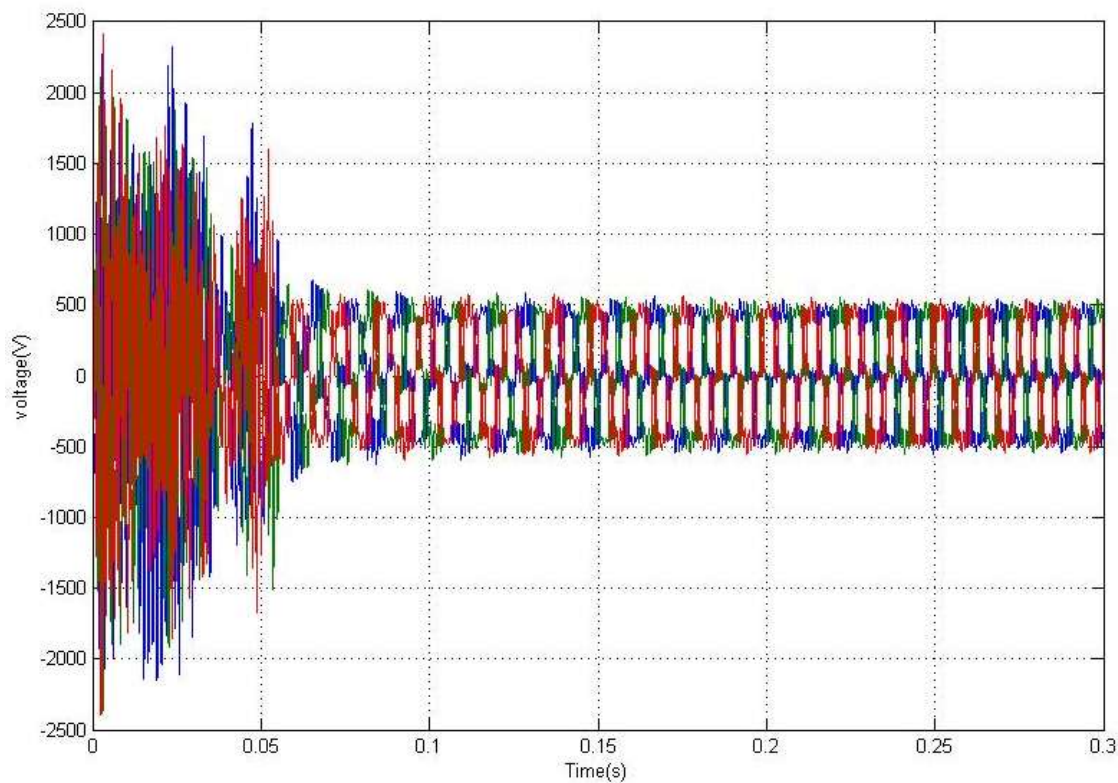
۴-۴-۱-۱ تغییرات ضریب دروپ توان اکتیو

برای این سناریو به ازای تغییر K_p خروجی های مساله مشاهده می شوند و به بررسی تاثیر تغییرات K_p بر شکل موج های خروجی مساله پرداخته خواهد شد. در این قسمت با افزایش ضریب دروپ توان اکتیو ($K_p=0/01$) نتایج بررسی می شوند .

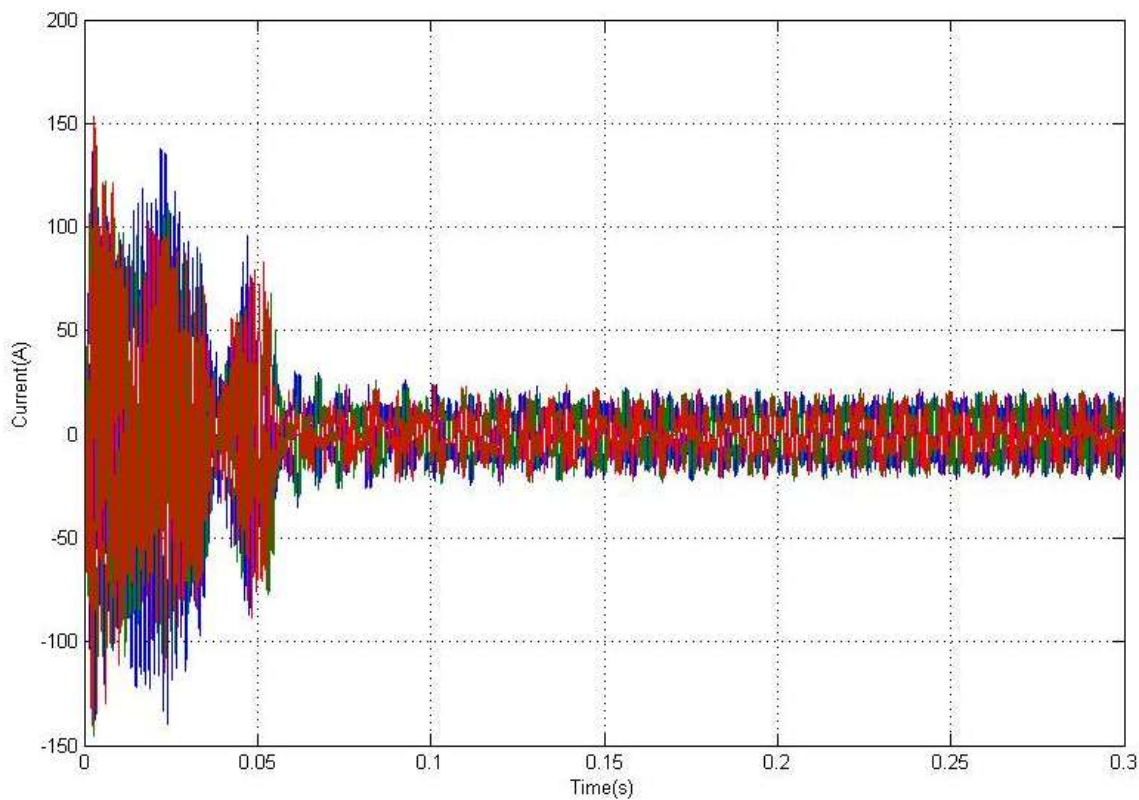


شکل (۴-۱۲) - فرکانس اینورتر ها به ازای $K_p=0/01$ $K_q=0/0001$

همانگونه که در شکل (۴-۱۲) مشاهده می شود، با مقایسه فرکانس سیستم در سناریو اول با فرکانس دو اینورتر در این سناریو این نتیجه حاصل می شود که با افزایش مقدار ضریب دروپ، فرکانس سیستم از میزان مرجع فاصله گرفته است و تا حدود ۴۵ هرتز کاهش می یابد.



شکل (۴-۱۳) - ولتاژ اینورترها به ازای $K_p=0.1$ $K_q=0.001$

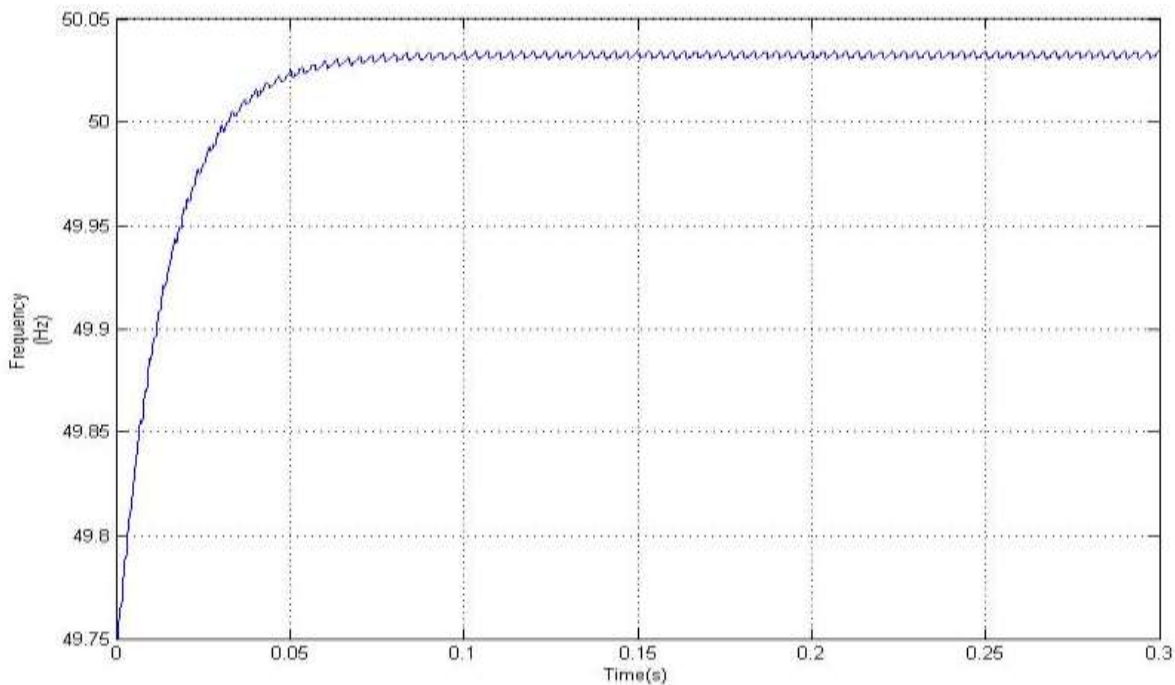


شکل ۴-۱۴ - جریان اینورترها به ازای $K_p=0.1$ $K_q=0.001$

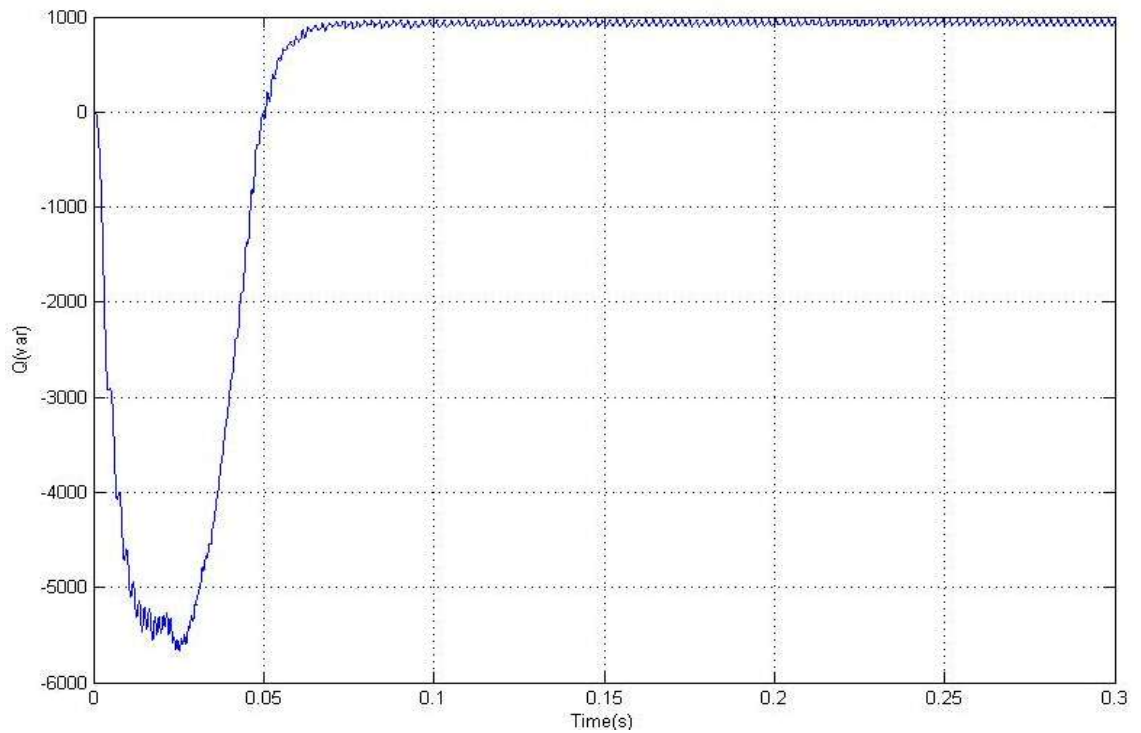
تغییرات K_p بر روی شکل موج نهایی ولتاژ و جریان تاثیر چندانی ندارد، اما باعث افزایش مقدار گذرای ولتاژ می شود که به سرعت به مقدار نهایی خود می رسد.

۴-۱-۲ تغییرات ضریب دروپ توان راکتیو

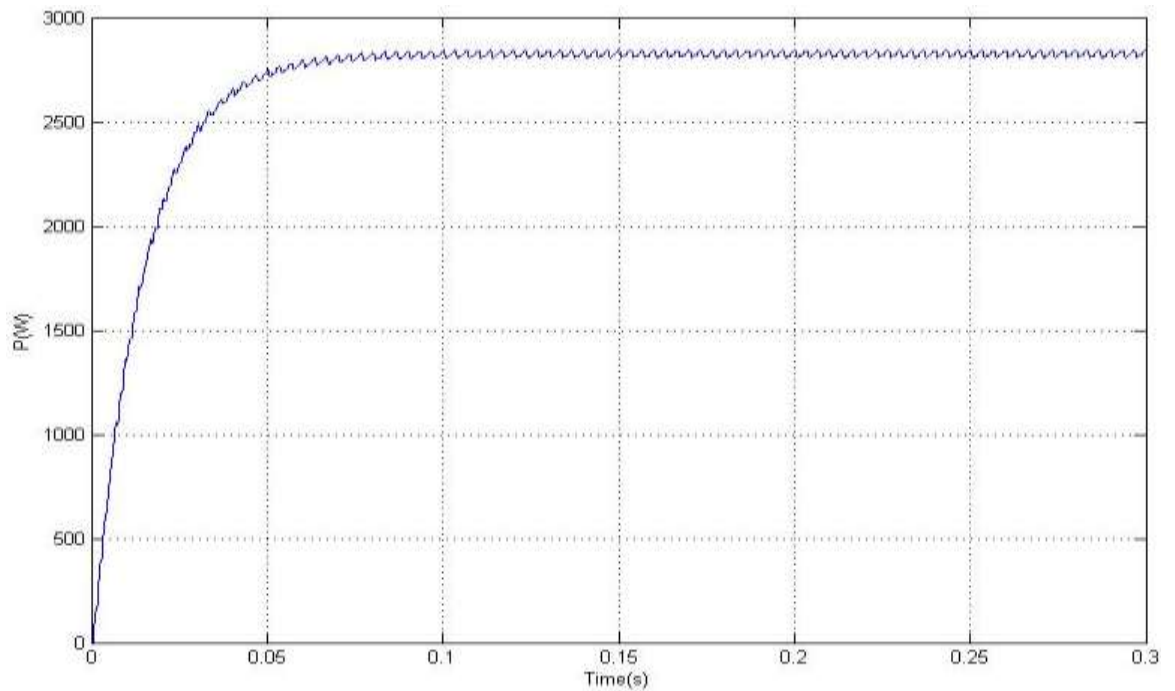
برای این سناریو به ازای تغییر K_q خروجی های مساله مشاهده می شوند و به بررسی تاثیر تغییرات K_q بر خروجی مساله پرداخته خواهد شد. در این قسمت تاثیر افزایش ضریب دروپ توان اکتیو ($K_q=0/01$) نتایج بررسی می شوند.



شکل (۴-۱۵) - فرکانس اینورترها به ازای $K_q=0/01$ $K_p=0/0001$



شکل (۱۶-۴) - تغییرات توان راکتیو به ازای $K_p=0/0001$ $K_q=0/01$



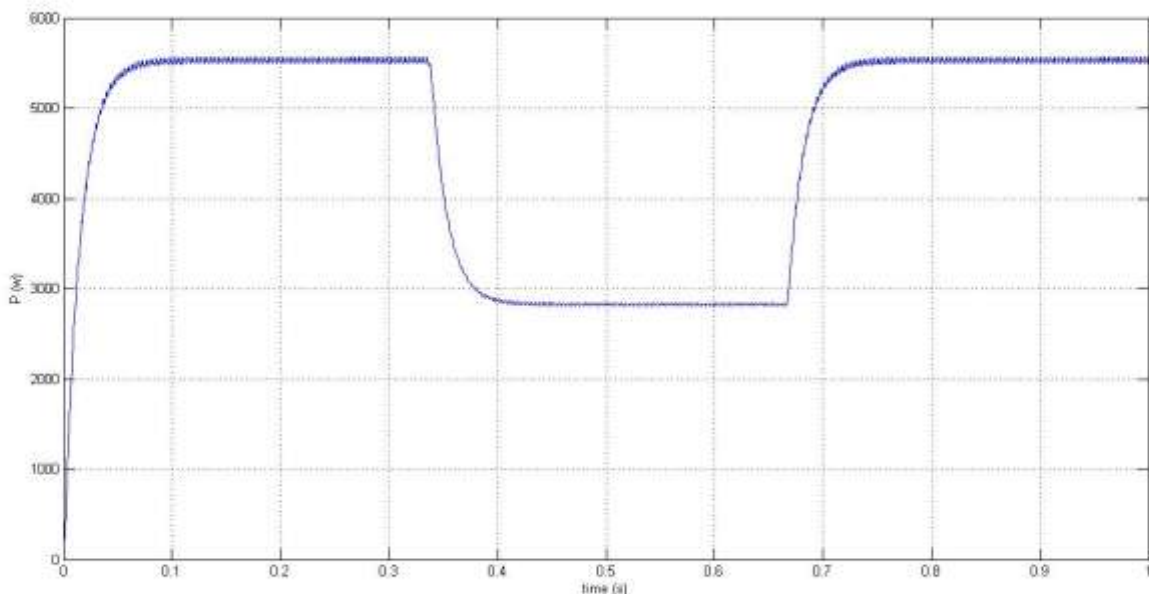
شکل (۱۷-۴) - تغییرات توان اکتیو به ازای $K_p=0/0001$ $K_q=0/01$

در نتایج این قسمت نیز تاثیر تغییرات K_q بر شکل موج ها و تغییرات فرکانس ها و ولتاژ سیستم کاملا مشهود می باشد، تاثیر تغییرات ضریب دروپ توان راکتیو بر روی توان راکتیو تاثیر

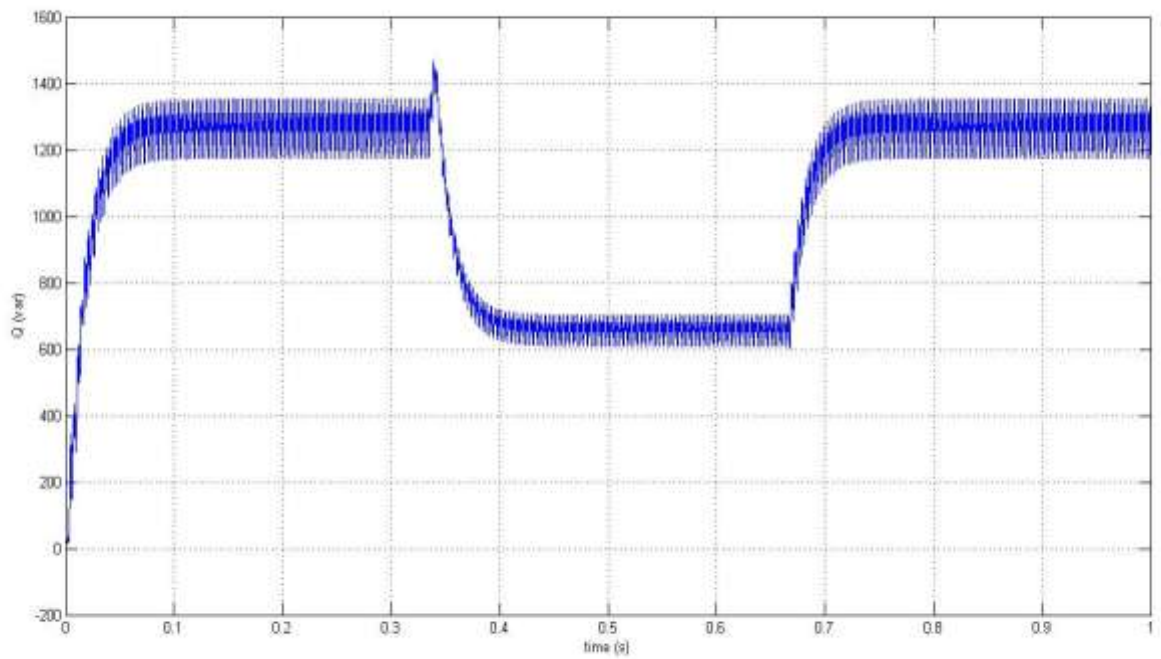
زیادی دارد و باعث فاصله گرفتن مقدار توان راکتیو از حالت کار عادی سیستم می شود. با این حال همان گونه که در شکل نیز مشاهده می شود تغییرات خروجی های شیه سازی در این حالت نسبت به حالت قبل تغییرات کمتر می باشند و می توان نتیجه گرفت سیستم نسبت به تغییرات ضریب دروپ توان راکتیو حساسیت کمتری است.

۳-۱-۴-۴ بررسی تغییرات بار بر ریز شبکه

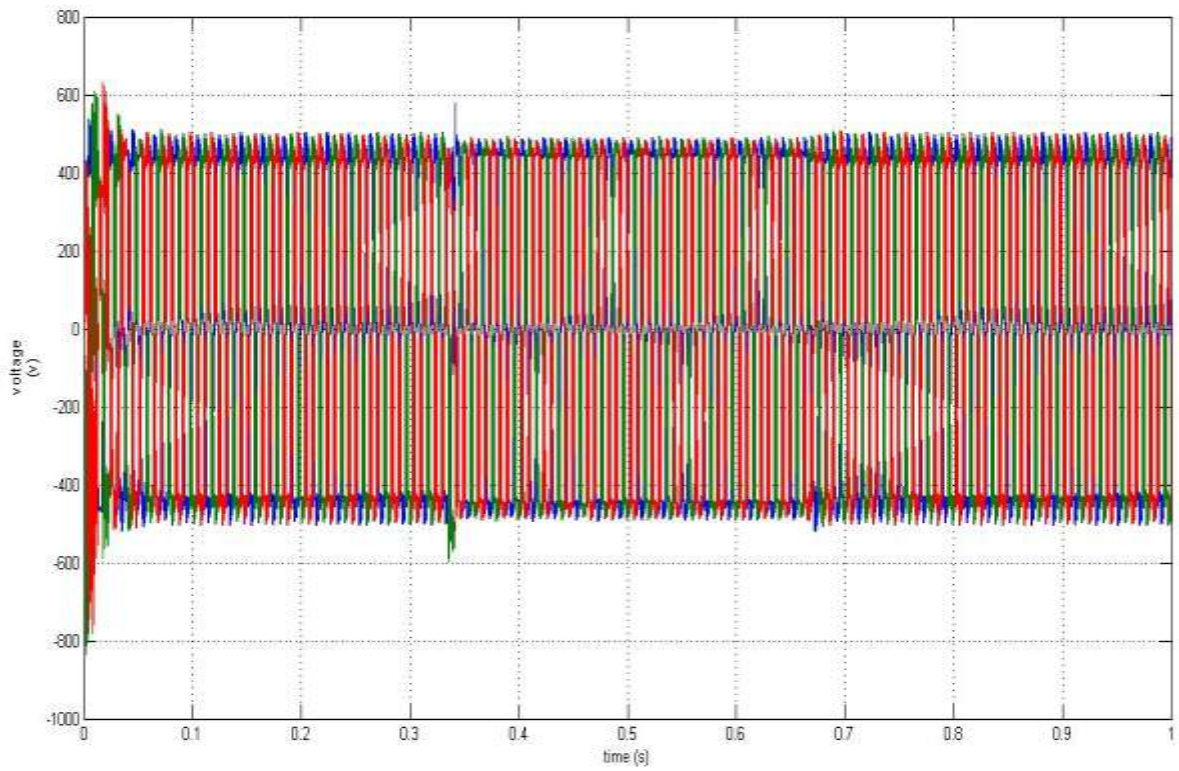
بعد از بررسی تاثیر تغییرات ضرایب دروپ به بررسی تاثیر تغییرات بار بر روی خروجی های مساله پرداخته می شود و رفتار ریز شبکه مستقل از شبکه را در این حالت خواهد شد. در این سناریو بار شبکه در لحظه $t=1/3$ s افزایش می یابد و سپس در $t=2/3$ s به میزان قبلی خود باز می گردد. ملاحظه می شود که فرکانس و ولتاژ و در ریز شبکه چگونه تغییر خواهد کرد و عملکرد سیستم را در مقابل این تغییرات بررسی می شود. در این حالت برای هر دو اینورتر، مقادیر $K_p=K_q=0/0001$ می باشند.



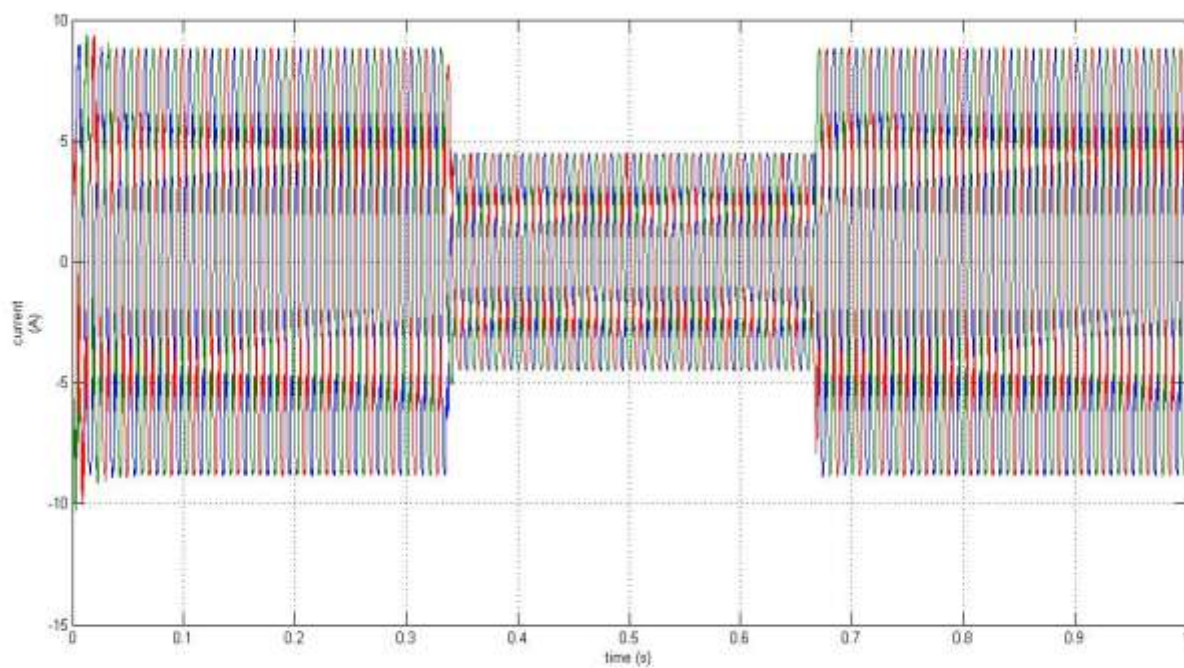
شکل (۱۸-۴) - بررسی تغییرات بار بر روی توان اکتیو خروجی اینورترها



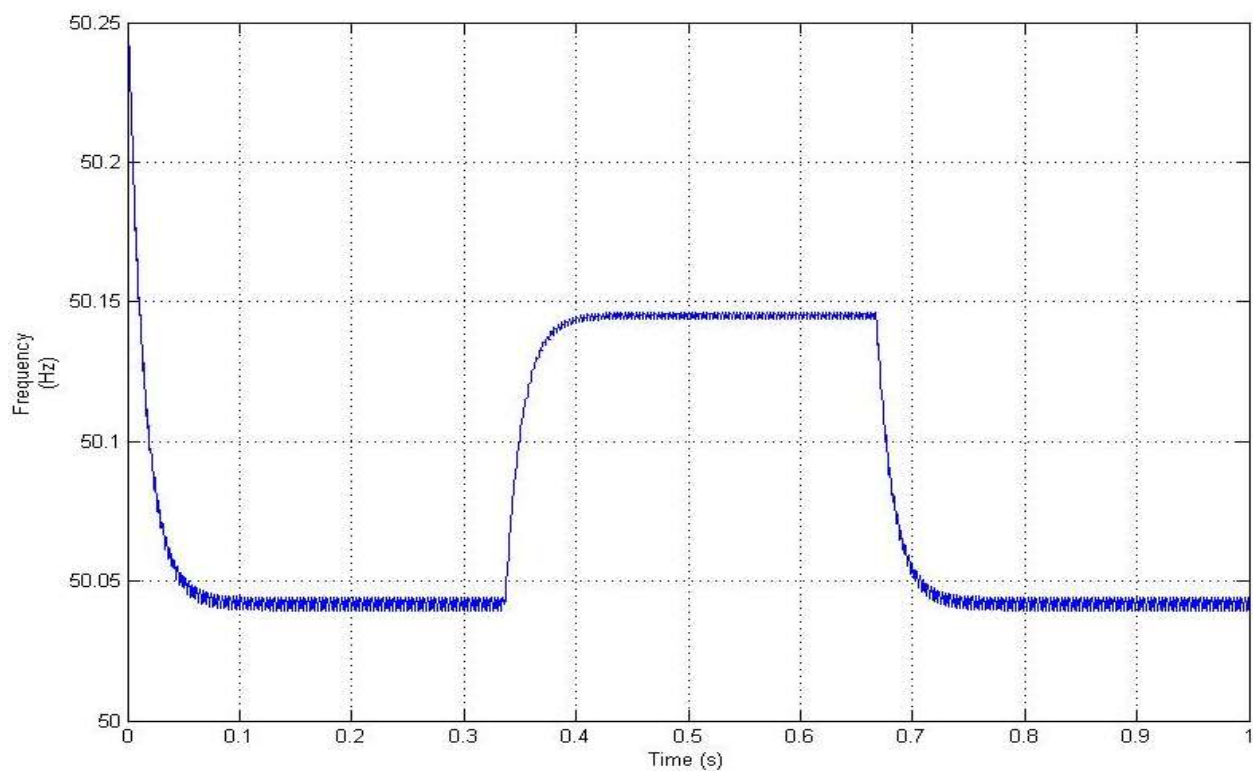
شکل (۱۹-۴) بررسی تغییرات بار بر روی توان راکتیو خروجی اینورترها



شکل (۲۰-۴) بررسی تغییرات بار بر شکل موج ولتاژ خروجی اینورترها



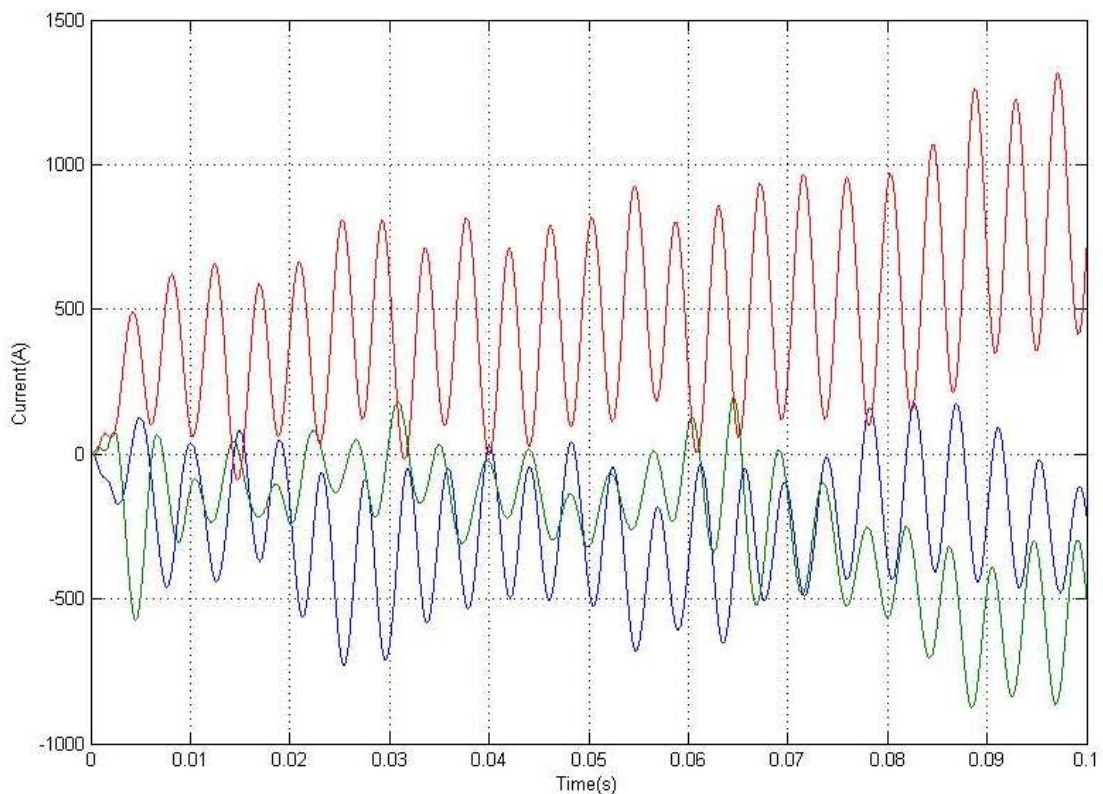
شکل (۲۱-۴) - بررسی تغییرات بار بر شکل موج جریان خروجی اینورترها



شکل (۲۲-۴) - بررسی تغییرات بار بر روی فرکانس ریز شبکه

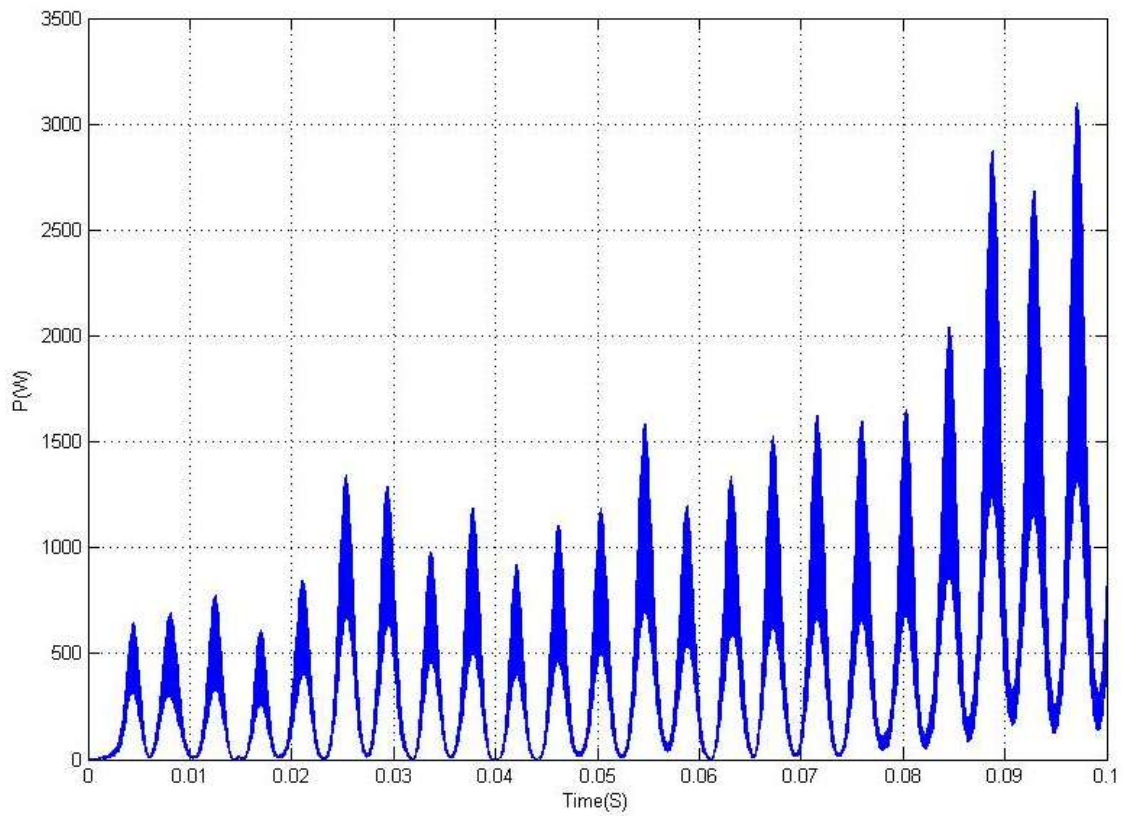
۴-۱-۴-۴ بررسی ریز شبکه در حضور بار توان ثابت

در این قسمت با اضافه کردن بار توان ثابت به ریز شبکه به بررسی نتایج پرداخته می شود. در این سناریو تمامی پارامترهای دو اینورتر کاملاً مشابه می باشد. نتایج این قسمت از شبیه سازی به صورت زیر خواهد بود :

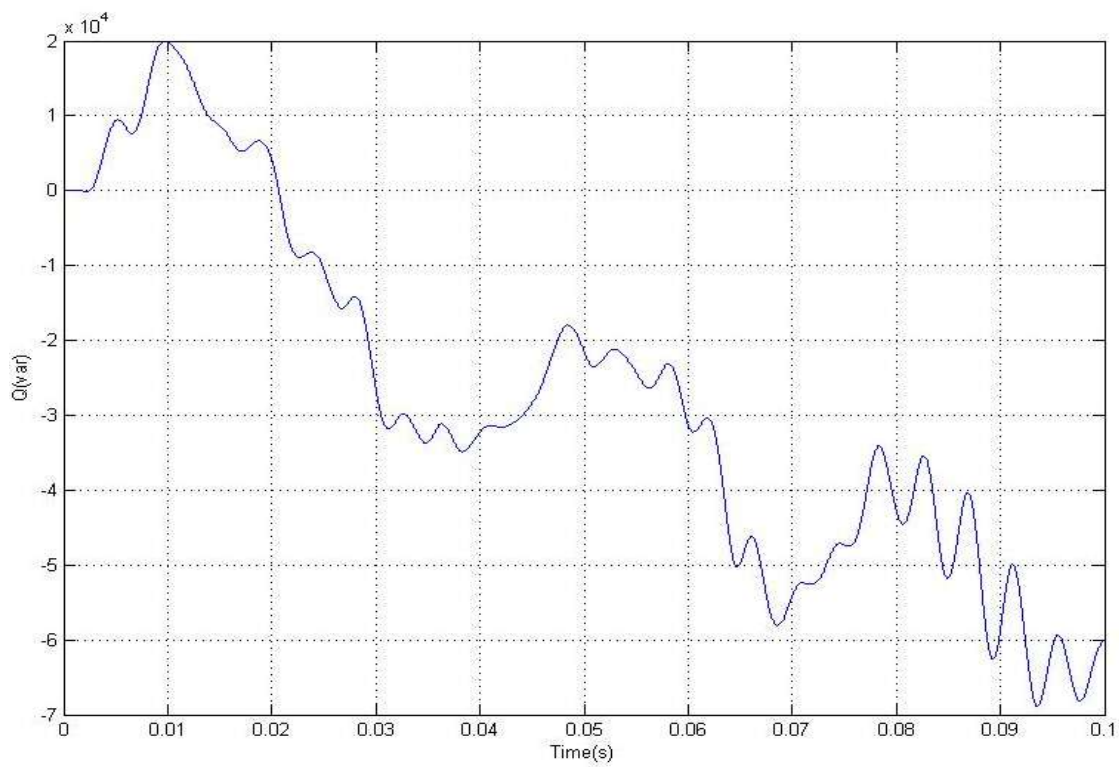


شکل (۴-۲۳) - تغییرات جریان خروجی اینورترها در حضور بار توان ثابت

در شکل (۴-۲۳) ولتاژ خروجی اینورترها مشاهده می شود، در این حالت به دلیل رفتار بار توان ثابت سیستم ناپایدار نوسانی می شود. توان اکتیو و راکتیو تولیدی اینورترها نیز در شکل زیر مشاهده می شوند.



شکل (۴-۲۴) - تغییرات توان اکتیو خروجی اینورترها در حضور بار توان ثابت



شکل (۴-۲۵) - تغییرات توان راکتیو خروجی اینورترها در حضور بار توان ثابت

۴-۵ جمع بندی

در این فصل بر اساس مدل فضای حالت سیستم به دست آمده در فصل گذشته به شبیه سازی رفتار یک ریز شبکه در حالت جزیره ای پرداخته شد و حساسیت مقادیر ویژه سیستم نسبت به ضرایب دروپ محاسبه شده و سپس با شبیه سازی در محیط سیمولینک و متلب به بررسی تاثیر روش دروپ و تغییرات ضرایب دروپ و استفاده از بار توان ثابت بر پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه مستقل از شبکه پرداخته شد. هم چنین تاثیر تغییرات بار بر شکل موج های سیستم بررسی شده است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری

پایداری دینامیکی در شبکه های برق بسیار مهم و ضروری می باشد و از این رو تلاش های فراوانی برای دست یابی به روش های آنالیز و بررسی پایداری در این سیستم ها مهم و لازم می باشد. در این میان بررسی ریز شبکه که در سال های اخیر جایگاه خود را در شبکه های برق پیدا کرده اند از اهمیت فراوانی برخوردار می باشند. ریز شبکه ها می توانند در حالت جزیره ای و متصل به شبکه به فعالیت بپردازند. بررسی ریز شبکه ها از چند منظر نسبت به حالت متصل به شبکه اهمیت دارد که می توان به صورت خلاصه گفت که علاوه بر تولید توان اکتیو و راکتیو، کنترل فرکانس ریز شبکه نیز باید در حالت مستقل از شبکه توسط روش های کنترلی در خود ریز شبکه کنترل می شود.

با توجه به دلایل توضیح داده شده، در این پایان نامه یک ریز شبکه در حالت جزیره ای مورد بررسی قرار گرفته شده است که توسط اینورتر های موازی توان تولیدی توسط ریز مولد ها را به شبکه تزریق می کند. در این پایان نامه از روش کنترلی دروپ جهت کنترل فرکانس و ولتاژ تولیدی ریز شبکه ها استفاده شده است که با استفاده از فیدبک گرفتن از توان اکتیو و راکتیو تولیدی ریز مولد ها این روش کنترلی میسر می شود. در این پژوهش یک مدل بر سیگنال کوچک در فضای حالت برای بررسی ریز شبکه پیشنهاد شده است که این مدل بر اساس ساده سازی برخی از قسمت های ریز شبکه نسبت به سایر کارهای انجام شده به دست آمده است و بر اساس آن به بررسی پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه پرداخته شده است. صحت مدلسازی انجام شده توسط شبیه سازی در محیط متلب انجام شده است. با تحلیل نتایج از شبیه سازی و تحلیل تغییرات مقادیر ویژه سیستم، تاثیر ضرایب دروپ بر پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه و تاثیر تغییرات مقاومت و راکتانس خطوط بر پایداری سیگنال کوچک بررسی شده اند، سپس با استفاده از مدل سیگنال کوچک بار توان ثابت و ترکیب آن با مدل سیگنال کوچک ریز شبکه جزیره ای به، یک مدل سیگنال کوچک در فضای حالت برای بررسی تاثیر بار توان ثابت در ریز شبکه جزیره ای به دست آمده است. با نتایج به دست آمده بر اساس مدل به

دست آمده، نقش ناپایدار کننده بار توان ثابت در ریزش شبکه جزیره ای مشهود است. در انتهای این پایان نامه نیز ریزش شبکه جزیره ای در محیط سیمولینک- متلب شبیه سازی شده است که بر اساس آن به تحلیل رفتار ریزش شبکه در حوزه زمان پرداخته شده است.

۲-۵ پیشنهادات

می توان پیشنهاد های زیر را برای ادامه این پژوهش پیشنهاد داد :

(۱) دست یابی به ضرایب بهینه دروپ توسط الگوریتم های بهینه سازی

(۲) استفاده از انواع دیگر مدل های دروپ در ریز شبکه

(۳) بررسی تاثیر نوع تولید پراکنده و در نظر گرفتن دینامیک ریزمولد ها

(۴) به دست آوردن یک روش کنترلی برای پایدار سازی ریز شبکه جزیره ای در حالت مستقل

از شبکه با بار توان ثابت

منابع

- [١]. “New control algorithms for the distributed generation interface in grid-connected and micro-grid systems” .Mohamed, Y. A.-R. I .PhD thesis, University of Waterloo, ٢٠٠٨.
- [٢]. Ishchenko, Anton .“Dynamics and Stability of Distribution Networks with Dispersed Generation”. ٢٠٠٨ .
- [٣]. Ritwik Majumder. “Some Aspects of Stability in Microgrids” .Member, IEEE: IEEE Transaction on power systems, ٢٠١٣.
- [٤]. “Abu Dhabi’s masdar plan takes shape” .Hopwood, D .Renewable Energy Focus, جلد , ٢٠١٠ vol. ١١, no. ١, pp. ٢٣-١٨.
- [٥]. Kundur, P. S .“Power System Stability and Control ” New York : McGraw-Hill, ١٩٩٤.
- [٦]. Nader, S. Energy Procedia. “Paths to a low-carbon economy the masdar example” , ٢٠٠٩ , vol. ١ no. ١, pp. ٣٩٥٨-٣٩٥١.
- [٧]. L. B. “Microgrids” .IEEE power engineering society winter meeting .New York . ٢٠٠١ , pp. ١٤٩-١٤٦.
- [٨]. M. Farooque and H.C. Maru, “Fuel cells—the clean and efficient power generators,” Proceedings of the IEEE, vol. ٨٩, issue ١٢, ٢٠٠١, pp. ١٨١٩-١٨٢٩.
- [٩]. M.W. Ellis, M.R. Von Spakovsky, and D.J. Nelson, “Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the ٢١st century,” Proceedings of the IEEE, vol. ٨٩, issue ١٢, December ٢٠٠١, pp. ١٨٠٨-١٨١٨.
- [١٠]. .T. Petru and T. Thiringer. Modeling of wind turbines for power system studies” .IEEE Transactions, جلد , ٢٠٠٢ vol. ١٧ no. ٤, pp. ١١٣٩-١١٣٢.
- [١١]. E. Muljadi, C. Butterfield, B. Parsons, and A. Ellis, " Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid ".Energy Conversion, IEEE

Transactions, جلد , ۲۰۰۷ vol. ۲۲.

- [۱۲]. B. C. Ummels, M. Gibescu, E. Pelgrum, W. L. Kling, and A. J. Brand. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch .. Energy Conversion IEEE Transactions on ,vol. . ۲۲.
- [۱۳]. Wind power in power systems .al, T. Ackermann et .Wiley Online Library , ۲۰۰۵, vol. . ۱۴۰.
- [۱۴]. Raducu, G. A. Control of grid side inverter in a b۲b configuration for wt application. Aalborg University . ۲۰۰۸ PED ۱۰۱۵-۱۰b.
- [۱۵]. M. Etezadi-Amoli and K. Choma, "Electrical performance characteristics of a new micro-turbine generator," in Power Engineering Society Winter Meeting, ۲۰۰۱. IEEE, vol. ۲, pp. ۷۳۶-۷۴۰.
- [۱۶]. M. Suter, Active filter for a microturbine. IET, ۲۰۰۱.
- [۱۷]. Salam, Zainal, Abdul Aziz, and Mohd Junaidi . The Design and Development of a High Performance Bi-directional Inverter For Photovoltaic Application . ۲۰۰۳.
- [۱۸]. N. Mohan and T. M. Undeland, Power electronics: " converters, applications, and design". John Wiley & Sons, ۲۰۰۷.
- [۱۹]. M. H. Rashid, "Power electronics handbook". Academic Pr, ۲۰۰۱.
- [۲۰]. Stability Analysis of Microgrids with Constant Power Loads . Duminda P. Ariyasinghe and D. Mahinda Vilathgamuwa, Senior Member, IEEE . ICSET , ۲۰۰۸.
- [۲۱]. A. M. Salamah, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Autonomous controller for improved dynamic performance of AC grid, parallel-connected, single-phase inverters," IET Gen., Transm., Distrib., vol. ۲, no. ۲, pp. ۲۰۹-۲۱۸, ۲۰۰۸.
- [۲۲]. M. Shahabi, M. R. Haghifam, M. Mohamadian, and S. A. Nabavi Niaki, "Microgrid dynamic performance improvement using a doubly fed

induction wind generator,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 1, pp. 137–140, Mar. 2009.

[23]. M. Reza, D. Sudarmadi, F. A. Viawan, W. L. Kling, and L. Van Der Sluis, “Dynamic stability of power systems with power electronic interfaced DG,” in Proc. 2006 IEEE PES Power Syst. Conf. and Exposition (PSCE’06), pp. 1423–1428.

[24]. P. H. Divshali, A. Alimardani, S. H. Hosseinian, and M. Abedi, “Decentralized cooperative control strategy of microsources for stabilizing autonomous VSC-based microgrids,” IEEE Trans. Power Syst., to be published.

[25]. M. N. Marwali, J. Jin-Woo, and A. Keyhani, “Control of distributed generation systems—Part II: Load sharing control,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, pp. 1001–1011, 2004.

[26]. J. M. Guerrero, J. Matas, V. L. Garcia de, M. Castilla, and J. Miret, “Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, pp. 994–1004, 2007.

[27]. M. N. Marwali, M. Dai, and A. Keyhani, “Robust stability analysis of voltage and current control for distributed generation systems,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 2, pp. 516–526, Jun. 2006.

[28]. M. N. Marwali, M. Dai, and A. Keyhani, “Stability analysis of load sharing control for distributed generation systems,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 3, pp. 737–740, Sep. 2007.

[29]. H. Y. Cho and E. Santi, “Modeling and stability analysis in multi-converter systems including positive feedforward control,” in Proc. 34th Annu. Conf. of IEEE Ind. Electron. (IECON 2008), Nov. 10–13, 2008,

pp. 839–844.

- [30]. N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, “Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 613–620, 2007.
- [31]. R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, “Power system stability and load sharing in distributed generation,” in *Proc. POWERCON & 2008 IEEE Power India Conf.*, New Delhi, India, 2008.
- [32]. R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, “Stability analysis and control of multiple converter based autonomous microgrid,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Control and Automation (ICCA)*, Christchurch, New Zealand, 2009.
- [33]. R. Majumder, B. Chaudhuri, A. Ghosh, R. Majumder, G. Ledwich, and F. Zare, “Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 796–808, May 2005.
- [34]. R. Kamel, A. Chaouachi, and K. Nagasaka, “Detailed analysis of micro-grid stability during islanding mode under different load conditions,” *Engineering*, vol. 3, no. 0, pp. 008–016, 2011.
- [35]. D. P. Ariyasinghe and D. M. Vilathgamuwa, “Stability analysis of microgrids with constant power loads,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Sustainable Energy Technol.*, 2008 (ICSET 2008), Nov. 24–27, 2008, pp. 279–284.
- [36]. D. M. Vilathgamuwa, X. N. Zhang, S. D. G. Jayasinghe, B. S. Bhangu, C. J. Gajanayake, and K. J. Tseng, “Virtual resistance based active damping solution for constant power instability in AC microgrids,” in *Proc. 37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON 2011)*, Nov. 7–10, 2011, pp. 3646–3651.

- [٣٧]. H. Karimi, H. Nikkhajoei, and R. Iravani, "Control of an electronically coupled distributed resource unit subsequent to an islanding event," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. ٢٣, no. ١, pp. ٤٩٣-٥٠١, Jan. ٢٠٠٨.
- [٣٨]. Undrill, J. M. Dynamic stability calculations for an arbitrary number of interconnected synchronous machines. *Power App. Syst*, *IEEE Trans*, جلد ١٩٦٨, vol. PAS ٨٧-pp. ٨٤٤-٨٣٥
- [٣٩]. B. Jensen, F. Blaabjerg, and P. N. Enjeti. Sharing of nonlinear loads in parallel connected three-phase converters. U. in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting جلد ٢٠٠٠, vol. ٥pp. ٢٣٤٥-٢٣٣٨
- [٤٠]. Ernane Antônio Alves Coelho, Porfírio Cabaleiro Cortizo, and Pedro Francisco Donoso Garcia. Small-Signal Stability for Parallel-Connected Inverters in Stand-Alone AC Supply Systems., Member, IEEE. Industry applications, *IEEE Transaction*, جلد ٢٠٠٢, VOL. ٣٨, NO. ٢
- [٤١]. N. Pogaku, M. Prodanovic, I.e. Green. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter based Microgrid. *Power Electronics*, *IEEE Transaction*, ٢٠٠٧pp. ٦١٣-٦٢٥
- [٤٢]. J. M. Guerrero, J. Matas, V. L. Garcia de, M. Castilla, and J. Miret. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance *IEEE Trans. Ind. Electron*, جلد ٢٠٠٧, vol. ٥٤ pp. ١٠٠٤-٩٩٤
- [٤٣]. Control methods of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system. Chung, Il-Yop, et al. *Industry Applications*, *IEEE Transactions*, ٢٠١٠, ١٠٨٨-١٠٧٨
- [٤٤]. Modeling, stability analysis and control of microgrid. Majumder, R, ٢٠١٠. Queensland University of Technology.
- [٤٥]. Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey. J. M. Carrasco, et al. *Industrial Electronics*, *IEEE Transactions on* جلد ٥٣, pp. ١٠١٦-١٠٠٢.

- [٤٦]. Concerns generated by islanding .P.L.Villeneuve .IEEE Power & Energy Magazine.٢٠٠٤ ,
- [٤٧]. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems .F. Blaabjerg, et al .Industrial Electronics, IEEE Transactions جلد ,vol. ٥٣,pp. ١٤٠٩-١٣٩٨,٢٠٠٦.
- [٤٨]. Power System Stability and Load Sharing in Distributed Generation .Ritwik Majumder, Student Member, IEEE, Arindam Ghosh, Fellow, IEEE ,IEEE, .٢٠٠٨.
- [٤٩]. Study on small signal stability of microgrids: A review and a new approach . Zheng Zeng , Huan Yang ,Rongxiang Zhao .Elsevier, .٢٠١١.
- [٥٠]. A. Emadi, A. Khaligh, C. Rivetta, and G. Williamson, “Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. ٥٥, no. ٤, pp. ١١١٢–١١٢٥, Jul. ٢٠٠٦.
- [٥١]. A. Kwasinski and C. Onwuchekwa, “Dynamic behavior and stabilization of dc microgrids with instantaneous constant-power loads,” IEEE Trans. Power Electron., vol. ٢٦, no. ٣, pp. ٨٢٢–٨٣٤, Mar. ٢٠١١.
- [٥٢]. A. Rahimi and A. Emadi, “Active damping in dc/dc power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. ٥٦, no. ٥, pp. ١٤٢٨–١٤٣٩, May ٢٠٠٩.
- [٥٣]. D. Marx, P. Magne, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, and B. Davat, “Large signal stability analysis tools in dc power systems with constant power loads and variable power loads: A review,” IEEE Trans. Power Electron., vol. ٢٧, no. ٤, pp. ١٧٧٣–١٧٨٧, Apr. ٢٠١٢.
- [٥٤]. A. Rahimi and A. Emadi, “An analytical investigation of dc/dc power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems,”

IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 58, no. 7, pp. 2689–2702, Jul. 2009.



Shahrood University of Technology

Faculty Of electrical engineering

Study on small signal stability in island microgrids

Behzad khakbaz

Supervisor:

Dr. M.Banejad

consultant:

Dr. A.Hajizadeh

September 2015

Abstract

Recently due to lack of nonrenewable sources, the human being tries to use renewable power such as sun power, wind power and etc. The renewable system can be grid connected or grid disconnected (islanded mode operation). One of the most important issues in these systems is small signal stability analysis.

In this thesis the small signal stability of renewable systems has been investigated in the islanded mode operation. In order to study the microgrid behavior based on differential equations in the state space, the small signal model of a part of the network is written in the state space. Then by combination of this equation, the final model for study the system has been obtained. To investigate the sensitivity of the eigenvalues of the system with respect to the system parameters, the sensitivity analysis with respect to the droop coefficient has been performed. The eigenvalue analysis based on the state space model has been carried out to find the changes in eigenvalues and also to investigate the small signal stability. Finally, the simulation of the obtained model has been undertaken in the Matlab software using. Also in the time domain simulation to compare the results of simulation to evaluate the effect of controller parameters and other parameters of the microgrid system on small signal stability, as well as the impact of constant power load that has been loaded on small signal stability.

Keywords: Small signal stability, Island microgrid, parallel inverters, Droop control, voltage source inverter, Eigenvalue analysis, load model