

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

تحلیل پایداری ماشین سنکرون مجازی در یک

ریزشبکه

نگارنده: رامین ارجمندزاده

استاد راهنما

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور

دکتر علی اکبرزاده کلات

دی ۱۳۹۹



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای
رشته گرایش () تحت عنوان :
با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام
می گردد: که در تاریخ

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☐ نظری	☐ عملی
نوع تحقیق:	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول			
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی			
۵- استاد ممتحن اول			
۶- استاد ممتحن دوم			

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم بہ:

پدرم بہ استواری کوه

مادرم بہ زلالی چشمہ

شکر و قدردانی

شکرتایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم.

به مصداق «من لم یَشکُر المخلوق لم یَشکُر الخالق» برخورد لازم می‌دانم از استاد فاضل و اندیشمندم،

جناب آقای دکتر مهدی باثراد که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از پیچ‌کلی در این

عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند.

همچنین شکر می‌کنم از جناب آقای دکتر علی اکبر زاده کلات که با صبر و شکیبایی و دانش فراوان خود بنده را در تهیه این

پایان نامه یاری نمودند.

از اساتید گرامی نیز، جناب آقای دکتر امیر حسن نیا و جناب آقای دکتر مجتبی شوالی که زحمت داوری

این پایان نامه را متقبل شدند شکر و قدردانی می‌کنم.

پاسکزاری نمایم.

اینجانب رامین ارجمندزاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل پایداری ماشین سنکرون مجازی در یک ریزشبکه تحت راهنمایی دکتر مهدی بانژاد متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 آن ها) 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 .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

در سیستم‌های قدرت مرسوم، اکثر توان توسط ژنراتورهای سنکرون که دارای اینرسی زیادی هستند تولید می‌شود. این اینرسی زیاد می‌تواند از تغییرات شدید و ناگهانی فرکانس در هنگام بروز اغتشاش در شبکه جلوگیری کند و پایداری شبکه را حفظ کند. امروزه با افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه که فاقد اینرسی هستند، اینرسی شبکه کاهش یافته و حساسیت شبکه نسبت به اغتشاشات بیشتر می‌شود. اخیراً، تکنولوژی ژنراتور سنکرون مجازی (VSG) پیشنهاد شده است که می‌تواند اینرسی را به صورت مجازی برای اینگونه منابع فراهم کند در نتیجه اینرسی شبکه افزایش می‌یابد.

در این پایان‌نامه ابتدا تحلیل پایداری دینامیکی یک سیستم VSG صورت گرفته است سپس بر اساس تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته یک طرح کنترلی معرفی شده است. برای تحقق و اثربخشی طرح کنترلی، VSG در محیط Matlab/Simulink شبیه‌سازی شد. سپس تحت دو سناریو تغییر توان مرجع و تغییر بار مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین طرح کنترلی برای انواع طرح‌های VSG یعنی: تکفاز، سه‌فاز و موازی پیاده سازی شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از موفقیت آمیز بودن طرح کنترلی در بهبود پایداری دینامیکی و سازگار بودن آن با انواع VSG های تکفاز، سه‌فاز و موازی می‌باشد. همچنین در ادامه، پایداری VSG را در مقابل حضور یک انحراف DC در شبکه توسط یک انتگرال‌گیر کلی مرتبه سوم (TOGI) بهبود بخشیدیم. TOGI در اینوترهای متصل به شبکه استفاده می‌شوند و قادر به استخراج دقیق مؤلفه‌های اساسی ولتاژ و جریان خروجی اینورتر حتی در شرایط هارمونیک و انحراف DC هستند.

همچنین یک طرح فازی جهت انتخاب مقدار بهینه اینرسی متناسب با شدت اغتشاش انتخاب شده است.

کلمات کلیدی: ژنراتور سنکرون مجازی، پایداری دینامیکی، منابع انرژی تجدیدپذیر، اینورتر، اینرسی

مجازی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- تأثیر اینرسی مجازی و ضریب میرایی در پایداری دینامیکی ژنراتور سنکرون مجازی. (چاپ شده)

2- A control strategy of variable J and D_p for a virtual synchronous generator
(در دست ارسال)

3- A fuzzy control strategy to improve the dynamic behavior of a VSG (در دست ارسال)

فهرست مطالب

ب	تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:
ط	فهرست جداول
ظ	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه.....
۴	۱-۲ انگیزه انجام تحقیق.....
۵	۱-۳ اهداف پایان نامه.....
۶	۱-۴ ساختار پایان نامه.....
۷	فصل ۲: مروری بر ژنراتور سنکرون مجازی و کاربرد آن
۸	۲-۱ مقدمه.....
۹	۲-۲ مفهوم VSG.....
۱۰	۲-۳ ذخیره سازی انرژی.....
۱۰	۲-۴ اینورتر.....

۱۱	۲-۴-۱ کاربردهای اینورتر.....
۱۱	۲-۴-۲ ساختار اینورتر.....
۱۳	۲-۵ مکانیزم کنترلی یک VSG.....
۱۴	۲-۵-۱ معادله نوسان ژنراتور سنکرون.....
۱۴	۲-۵-۲ بلوک تشخیص فرکانس.....
۱۵	۲-۵-۳ بلوک محاسبه توان.....
۱۶	۲-۵-۴ بلوک مدل گاورنر.....
۱۷	۲-۵-۵ بلوک کنترل افتی $V - Q$
۲۲	۲-۶ کنترل اینرسی مجازی.....
۲۶	۲-۷ کنترل روتور مجازی.....
۳۰	۲-۸ جمع‌بندی.....

فصل ۳: تحلیل تاثیر ضریب میرایی و اینرسی بر عملکردهای دینامیکی VSG ۳۳

۳۴	۳-۱ مقدمه.....
۳۴	۳-۲ اصول کار یک VSG.....
۳۵	۳-۳ مدلسازی یک VSG.....
۳۷	۳-۴ تاثیر ضریب میرایی (D_p) و اینرسی (J) بر عملکرد دینامیکی VSG.....

۳-۴-۱	تأثیر ضریب میرایی بر عملکرد دینامیکی توان و فرکانس VSG	۳۷
۳-۴-۲	تأثیرات اینرسی (J) بر عملکرد دینامیکی توان اکتیو و فرکانس VSG	۴۵
۳-۵	جمع‌بندی	۴۹
فصل ۴	روش‌های پیشنهادی برای بهبود عملکرد VSG	۵۱
۴-۱	مقدمه	۵۲
۴-۲	اینرسی انعطاف پذیر	۵۲
۴-۲-۱	اجرای کنترل متناوبی J	۵۴
۴-۲-۱-۱	سناریو اول: تغییر توان تولیدی	۵۶
۴-۲-۱-۲	سناریو دوم: تغییر توان بار	۵۸
۴-۲-۲	کنترل متناوبی J و D_p	۶۰
۴-۲-۳	اجرای کنترل متناوبی با مقادیر مختلف J و D_p	۶۳
۴-۲-۴	اجرای کنترل متناوبی J و D_p برای طرح VSG سه‌فاز	۶۶
۴-۲-۵	اجرای کنترل متناوبی بر روی طرح Multi-VSG	۶۹
۴-۳	پیاده سازی اینرسی انعطاف‌پذیر به روش فازی	۷۰
۴-۳-۱	ساختار منطق فازی	۷۱
۴-۳-۱-۱	قوانین پایه	۷۱

۷۲.....۴-۳-۱-۲ فاز ی سازی

۷۳.....۴-۳-۱-۳ موتور استنتاج یا هوش

۷۳.....۴-۳-۱-۴ برگرداندن از فاز ی

۷۸.....۴-۴ بهبود پایداری VSG در شرایط وجود انحراف DC

۸۱.....۴-۵ عملکرد VSG در یک ریزش بکه با وجود منابع دارای اینرسی واقعی

۸۴.....۴-۶ جمع بندی

۸۵ فصل ۵: نتایج و پیشنهادات

۸۶.....۵-۱ نتیجه گیری

۸۷.....۵-۲ پیشنهادات

۸۸ منابع

فهرست جداول

جدول ۱-۲: پارامترهای شبیه‌سازی ریزش‌بکه فوق.....	۲۵
جدول ۱-۳: پارامترهای سیستم.....	۳۸
جدول ۲-۳: تاثیر D_p و J بر عملکردهای دینامیکی توان و فرکانس.....	۴۹
جدول ۱-۴: قوانین J	۵۳
جدول ۲-۴: قوانین J و D_p	۶۰
جدول ۳-۴: پارامترهای شبیه‌سازی سیستم سه‌فاز.....	۶۷
جدول ۴-۴: نمونه یک فازی سازی ۷ حالت.....	۷۲
جدول ۵-۴: جدول قوانین فازی.....	۷۶
جدول ۶-۴: پارامترهای شبیه‌سازی ریزش‌بکه فوق.....	۸۳

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: ساختار ریز شبکه..... ۳
- شکل ۲-۱: ارتباط بین منبع و بار با یک مبدل..... ۴
- شکل ۱-۲: مفهوم کلی یک VSG..... ۹
- شکل ۲-۲: ساختار کلی یک VSG..... ۱۰
- شکل ۳-۲: شماتیک مداری یک اینورتر سه فاز..... ۱۲
- شکل ۴-۲: اینورتر منبع ولتاژ سه فاز: (الف) سیگنال‌های مرجع a, b, c و سیگنال حامل، (ب) حالت کلید ۱، (ج) حالت کلید ۳..... ۱۲
- شکل ۵-۲: یک بلوک دیاگرام کلی برای سیستم VSG..... ۱۳
- شکل ۶-۲: بلوک آشکارساز فرکانس (PLL)..... ۱۴
- شکل ۷-۲: مشخصه افقی $\omega - p$ ۱۶
- شکل ۸-۲: بلوک مدل گاورنر..... ۱۷
- شکل ۹-۲: مشخصه افقی $V - Q$ ۱۷
- شکل ۱۰-۲: محاسبه ωm توسط روش Runge-Kutta..... ۱۹
- شکل ۱۱-۲: معادل‌سازی میان اینرسی ژنراتور سنکرون و خازن..... ۲۰
- شکل ۱۲-۲: منحنی اینرسی مجازی H_p متناسب با مقدار خازن، ولتاژ DC و نرخ تغییرات آن..... ۲۱
- شکل ۱۳-۲: بلوک دیاگرام معادله نوسان بدون ضریب میرایی..... ۲۳
- شکل ۱۴-۲: بلوک دیاگرام یک اینورتر..... ۲۳
- شکل ۱۵-۲: بلوک دیاگرام اینرسی مجازی در یک اینورتر..... ۲۴

- شکل ۲-۱۶: ریزشبه ساده برای بررسی عملکرد کنترل اینرسی مجازی..... ۲۴
- شکل ۲-۱۷: بلوک دیاگرام ریزشبه فوق..... ۲۵
- شکل ۲-۱۸: انحراف فرکانسی برای ۱۰ درصد تغییر بار در ریزشبه..... ۲۶
- شکل ۲-۱۹: بلوک دیاگرام روتور مجازی..... ۲۶
- شکل ۲-۲۰: انحراف فرکانس ریزشبه با ضرایب مختلف میرایی..... ۲۷
- شکل ۳-۱: شماتیک مداری VSG مورد مطالعه ۳۵
- شکل ۳-۲: حلقه کنترل توان اکتیو_فرکانس VSG..... ۳۶
- شکل ۳-۳: مدل خطی شده حلقه کنترل فرکانس_توان..... ۳۶
- شکل ۳-۴: پاسخ پله توان با تغییر D_p ۳۹
- شکل ۳-۵: نمودارهای شاخص‌های دینامیکی توان باتوجه به تغییر D_p . (الف) زمان نشست. (ب) اضافه جهش. (ج) زمان پیک..... ۴۱
- شکل ۳-۶: پاسخ پله فرکانس با تغییر D_p ۴۲
- شکل ۳-۷: نمودارهای شاخص‌های دینامیکی فرکانس باتوجه به تغییر D_p . (الف) زمان پیک. (ب) اضافه جهش. (ج) زمان نشست..... ۴۴
- شکل ۳-۸: پاسخ پله توان با تغییر J ۴۵
- شکل ۳-۹: نمودارهای شاخص‌های دینامیکی توان با تغییر J . (الف) اضافه جهش. (ب) زمان پیک. (ج) زمان نشست..... ۴۶
- شکل ۳-۱۰: پاسخ پله فرکانس با تغییر J ۴۷
- شکل ۳-۱۱: نمودارهای شاخص‌های دینامیکی فرکانس با تغییر J . (الف) اضافه جهش. (ب) زمان نشست..... ۴۸
- شکل ۴-۱: تغییرات زاویه/توان..... ۵۳

- شکل ۲-۴: مدار قدرتی یک VSG تکفاز..... ۵۴
- شکل ۳-۴: توپولوژی کنترل متناوبی J..... ۵۵
- شکل ۴-۴: SOGI برای محاسبه توان VSG..... ۵۵
- شکل ۵-۴: مدار تنظیم کننده ولتاژ اتوماتیک (AVR)..... ۵۶
- شکل ۶-۴: فرکانس سیستم با هر دو استراتژی کنترلی..... ۵۷
- شکل ۷-۴: توان خروجی VSG با هر دو استراتژی کنترلی..... ۵۷
- شکل ۸-۴: جریان VSG..... ۵۸
- شکل ۹-۴: روند تغییرات J..... ۵۸
- شکل ۱۰-۴: تغییر بار..... ۵۹
- شکل ۱۱-۴: فرکانس سیستم با هر دو استراتژی کنترل کننده..... ۵۹
- شکل ۱۲-۴: شکل موج توان خروجی VSG با هر دو استراتژی کنترلی..... ۶۰
- شکل ۱۳-۴: فرکانس سیستم با هر سه استراتژی کنترلی..... ۶۱
- شکل ۱۴-۴: توان خروجی VSG با هر سه استراتژی کنترلی..... ۶۱
- شکل ۱۵-۴: روند تغییرات J و D_p ۶۲
- شکل ۱۶-۴: فرکانس سیستم با هر سه استراتژی کنترلی..... ۶۲
- شکل ۱۷-۴: توان خروجی VSG با هر سه استراتژی کنترلی..... ۶۳
- شکل ۱۸-۴: فرکانس سیستم با مقادیر مختلف بازه تغییرات J و D_p ۶۴
- شکل ۱۹-۴: توان خروجی VSG با مقادیر مختلف بازه تغییرات J و D_p ۶۴
- شکل ۲۰-۴: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۰,۶ برابر..... ۶۵
- شکل ۲۱-۴: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۰,۸ برابر..... ۶۵
- شکل ۲۲-۴: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۱ برابر..... ۶۵

- شکل ۴-۲۳: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۱,۴ برابر..... ۶۶
- شکل ۴-۲۴: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۲ برابر..... ۶۶
- شکل ۴-۲۵: مدار قدرتی سیستم سه فاز مورد مطالعه..... ۶۷
- شکل ۴-۲۶: شکل موج فرکانس شبکه با هر سه کنترل کننده..... ۶۸
- شکل ۴-۲۷: توان خروجی VSG سه فاز با هر سه کنترل کننده..... ۶۸
- شکل ۴-۲۸: جریان شبکه. (الف) کنترل معمولی. (ب) کنترل متناوبی J . (ج) کنترل متناوبی J و D_p ۶۸
- شکل ۴-۲۹: ریزش شبکه با دو VSG موازی..... ۶۹
- شکل ۴-۳۰: فرکانس سیستم. (الف) VSG1. (ب) VSG2..... ۷۰
- شکل ۴-۳۱: ساختار کلی یک سیستم فازی..... ۷۱
- شکل ۴-۳۲: یک نمونه توابع عضویت برای یک فازی سازی ۷ حالت..... ۷۳
- شکل ۴-۳۳: توابع عضویت فازی. (الف) $d\omega/dt$. (ب) $\Delta\omega$ ۷۵
- شکل ۴-۳۴: نحوه تغییر J به روش فازی..... ۷۷
- شکل ۴-۳۵: فرکانس سیستم با کنترل فازی و معمولی..... ۷۷
- شکل ۴-۳۶: انتگرال گیر تعمیم یافته مرتبه سوم (TOGI)..... ۷۹
- شکل ۴-۳۷: فرکانس سیستم..... ۸۰
- شکل ۴-۳۸: توان خروجی VSG..... ۸۰
- شکل ۴-۳۹: فرکانس سیستم با وجود انحراف DC..... ۸۰
- شکل ۴-۴۰: توان خروجی VSG با وجود انحراف DC..... ۸۱
- شکل ۴-۴۱: ریزش شبکه مورد مطالعه در این بخش..... ۸۲
- شکل ۴-۴۲: فرکانس ریزش شبکه فوق تحت آزمایش تغییر بار..... ۸۲

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه

امروز گرم شدن زمین ناشی از اثرات گلخانه‌ای یک مسئله مهم به‌شمار می‌رود. تولید انرژی الکتریکی یکی از منابع اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای^۱ است. در دسامبر ۱۹۹۷، موافقت‌نامه کیوتو^۲ برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان ایجاد شد. در زمینه تولید برق، این موافقت‌نامه منابع انرژی تجدیدپذیر^۳ را معرفی می‌کند. انرژی قابل تجدید، انرژی تولید شده از منابع طبیعی تجدیدپذیر مانند نور خورشید، باد، اقیانوس، انرژی آبی، بایومس^۴، منابع زمین‌گرمایی^۵، سوخت‌های زیستی و هیدروژن می‌باشد. منابع انرژی تجدیدپذیر در تنوع ذخیره انرژی شرکت می‌کنند و خطر استفاده مداوم و گسترده از سوخت‌های فسیلی و انرژی هسته‌ای را کاهش می‌دهند. منابع انرژی تجدیدپذیر گزینه‌های مطلوبی برای مصرف‌کنندگان فراهم می‌کنند و همچنین بیشترین گزینه‌های عرضه انرژی مطلوب محیطی در بازارهای فعلی هستند [1].

امروز سازمان‌های دولتی و عمومی به استفاده از انرژی با تکنولوژی‌های پاک و امکان‌پذیر علاقمند هستند [2] و [3]. ترکیبی از دستگاه‌های ذخیره انرژی و تولیدات پراکنده، یک سیستم مولد توان هیبریدی^۶ را تشکیل می‌دهد که می‌تواند توان را نه تنها برای بار محلی، بلکه همچنین می‌تواند خدمات جانبی را به شبکه اصلی همانند ژنراتورهای معمولی عرضه کند [4] و [5]. در این راستا، از ریزشبکه‌ها^۷ برای ادغام منابع تولید پراکنده در شبکه استفاده می‌شوند. یک ریزشبکه یک سیستم قدرت مستقل و قابل کنترل می‌باشد که شامل تولیدات پراکنده، بار، ذخیره‌ساز انرژی و دستگاه‌های کنترلی است. یک ریزشبکه

^۱ Greenhouse Gases

^۲ Kyoto Protocol

^۳ Renewable Energy Sources

^۴ Biomass

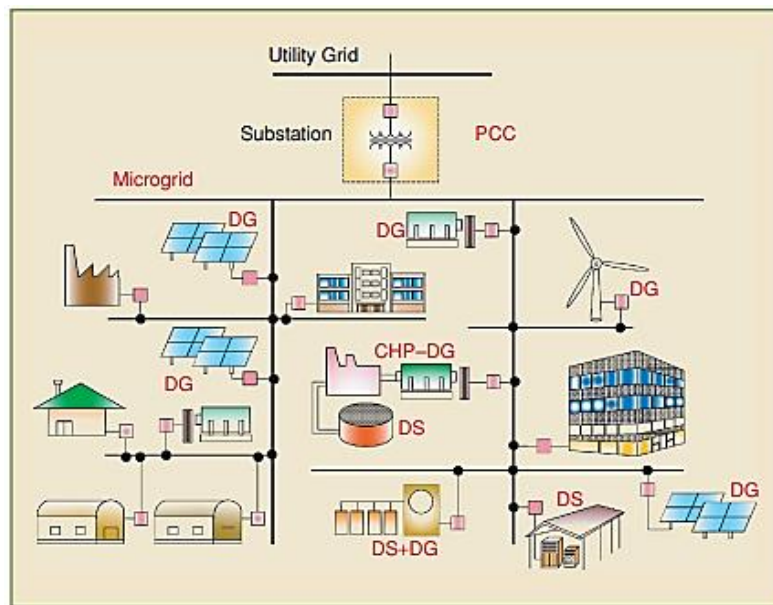
^۵ Geothermal Resources

^۶ Hybrid

^۷ Microgrid

می تواند به طور موازی با شبکه اصلی یا به صورت جزیره‌ای^۱ کار کند.

منابع تولیدپراکنده می توانند از دو طریق به ریزشبکه‌ها متصل شوند، گروه اول از طریق ماشین‌های الکتریکی دوار و گروه دوم از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت. ویژگی‌ها و استراتژی‌های کنترل این مبدل‌ها با ماشین‌های الکتریکی مرسوم تفاوت زیادی دارند، بنابراین، رفتار دینامیکی و کنترل ریزشبکه‌ها با سیستم‌های قدرت مرسوم متفاوت است [6]. شکل (۱-۱) ساختار یک ریزشبکه را نشان می‌دهد.

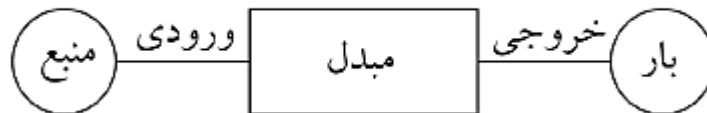


شکل ۱-۱: ساختار ریز شبکه [7]

هدف یک مدار الکترونیک قدرت، تطبیق ولتاژ و جریان برای بار با توجه به منبع آن می‌باشد. مدارهای الکترونیک قدرت یک نوع و یا یک سطح از شکل موج ولتاژ یا جریان را به یک نوع یا یک سطح دیگری تبدیل می‌کنند (به عنوان مثال، تولید نیروگاه‌های خورشیدی DC می‌باشد که برای متصل شدن به یک شبکه AC می‌بایست از یک مبدل DC به AC (اینورتر) استفاده شود)، در نتیجه به آن‌ها مبدل گفته می‌شود. مبدل‌ها همان گونه که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است به عنوان یک رابط بین منبع و بار به کار گرفته می‌شوند.

^۱ Islanded

این مدارها توسط قطعات نیمه‌هادی همانند کلید عمل می‌کنند، در نتیجه می‌توانند ولتاژ یا جریان را کنترل یا اصلاح کنند. به‌طور کلی ساز و کار الکترونیک قدرت، تبدیل AC به DC، تبدیل DC به AC، تبدیل یک ولتاژ تنظیم نشده DC به یک ولتاژ تنظیم شده DC و تبدیل یک منبع AC با دامنه و فرکانس معین به یک دامنه و فرکانس دیگر می‌باشد. از جمله کاربردهای رایج الکترونیک قدرت می‌توان در تجهیزات توان بالا مانند خطوط انتقال DC تا لوازم توان پایین مانند منابع تغذیه کامپیوترها، شارژر موبایل، خودروهای برقی و ... نام برد و از میلی وات تا مگا وات را در بر می‌گیرند.



شکل ۱-۲: ارتباط بین منبع و بار با یک مبدل

در سیستم‌های قدرت متداول، توان، اغلب توسط ژنراتورهای سنکرون با روتور دوار که دارای اینرسی^۱ می‌باشند تولید می‌شود. اما امروزه با افزایش گرایش جهانی به استفاده از منابع تولید پراکنده، توان توسط منابع مختلف با ویژگی‌های متفاوت تولید می‌شود که این مسئله موجب ایجاد چالش‌های جدیدی در سیستم قدرت شده است. یکی از این چالش‌ها، مسئله کمبود اینرسی در شبکه‌ها است که منجر به تغییرات شدید فرکانسی در هنگام بروز اغتشاش در شبکه می‌شود. نرخ این تغییرات با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده افزایش می‌یابد.

۱-۲ انگیزه انجام تحقیق

روتور ژنراتورهای سنکرون یک توده سنگین در حال چرخش است لذا دارای اینرسی ذاتی می‌باشد، بنابراین در هنگام بروز اغتشاش که منجر به تغییر سرعت روتور می‌شود، سرعت به یکباره نمی‌تواند تغییر

^۱ Inertia

کند. در نتیجه این موضوع باعث ایجاد تعادل در هنگام بروز اغتشاش می‌شود. پس از اینرسی روتور برای میرا کردن نوسانات موجود در سرعت روتور می‌توان استفاده کرد. باتوجه به اینکه اخیراً استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر الکترونیک قدرت افزایش یافته است و اینگونه تجهیزات به علت فقدان اینرسی در مقابل نوسانات از میرایی لازم برخوردار نیستند و لذا هرگاه اغتشاش در شرایط اینگونه منابع رخ دهد، می‌تواند ناپایداری را به دنبال داشته باشد و یا اینکه منجر به قطع بارهای ناخواسته، خرابی‌های پی در پی و یا حتی خاموشی در مقیاس بزرگ شود. بر این اساس لازم است از روش‌هایی استفاده گردد که اینرسی مورد نیاز برای میرا کردن نوسانات فراهم شود. برای این منظور، تکنولوژی ژنراتور سنکرون مجازی^۱ (VSG) پیشنهاد شده است که می‌تواند ویژگی‌های ظاهری یک ژنراتور سنکرون را تقلید کند و یک اینرسی مجازی برای مبدل‌های متصل شده به شبکه فراهم کند. بنابراین اینرسی برای تقویت عملکرد ایمنی و پایداری سیستم قدرت بهبود می‌یابد.

۳-۱ اهداف پایان‌نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه بررسی پایداری دینامیکی یک VSG در برابر اغتشاشات و همچنین ارائه روش‌هایی برای بهبود پاسخ گذرای آن می‌باشد.

مهم‌ترین دست‌آوردهای این پایان‌نامه، بررسی عملکرد یک VSG در شرایط وجود یک انحراف DC در شبکه و ارائه روشی برای حذف این انحراف می‌باشد. این روش یک انتگرال‌گیر کلی مرتبه سوم (TOGI) است که می‌تواند مؤلفه‌های اساسی ولتاژ و جریان خروجی اینورتر را حتی در شرایط هارمونیک و انحراف DC به‌خوبی استخراج کند. یک طرح کنترل فازی نیز برای بهبود رفتار گذرای VSG در مواقع اغتشاش ارائه شده است. همچنین این طرح می‌تواند مقدار بهینه اینرسی را متناسب با شدت اغتشاش تعیین کند.

^۱ Virtual Synchronous Generator

۴-۱ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در پنج فصل ارائه شده است:

در فصل دوم، مفهوم یک VSG معمولی به طور کلی توضیح داده شده و همچنین مروری بر تحقیقات مربوطه صورت گرفته است.

در فصل سوم، تاثیر اینرسی و ضریب میرایی بر عملکردهای دینامیکی VSG مانند زمان پاسخ، زمان نشست، اضافه جهش و ... بررسی شده است. در این فصل شبیه سازی های حوزه زمانی بر اساس تئوری های صورت گرفته انجام شده است.

در فصل چهارم روش های پیشنهادی برای بهبود عملکرد VSG ارائه شده است. در این فصل یک کنترل کننده متناوبی معرفی شده و سپس بر روی VSG تک فاز، سه فاز و موازی پیاده سازی شده است. از عمده کارهای انجام شده در این فصل یک طرح کنترل فازی برای بهبود رفتار گذرای VSG و همچنین معرفی یک TOGI است که توسط آن پایداری VSG در شرایط وجود هارمونیک اضافی و انحراف DC بهبود می یابد.

در فصل پنجم جمع بندی و پیشنهادات برای کارهای آینده ارائه شده است.

فصل ۲: مروری بر ژنراتور سنکرون مجازی و کاربرد آن

۱-۲ مقدمه

انرژی جنبشی ذاتی (اینرسی روتور) و مشخصه میرایی (به علت اصطکاک مکانیکی و تلفات الکتریکی در استاتور، میدان و سیم‌پیچ دمپر^۱) ژنراتورهای بزرگ نقش قابل توجهی را در پایداری شبکه بازی می‌کنند. همانطور که در فصل قبل اشاره شد، در مقایسه با نیروگاه‌های معمولی بزرگ که در آن ماشین سنکرون غالب است، واحدهای تولید پراکنده دارای مقدار بسیار کوچک یا بدون هیچ‌گونه چرخش (که منبع اصلی اینرسی است) و ویژگی میرایی هستند.

با افزایش سطح نفوذ تولیدات پراکنده / منابع انرژی تجدیدپذیر، تأثیر اینرسی و میرایی کم بر روی عملکرد دینامیکی و پایداری شبکه افزایش می‌یابد. یک راه حل برای تثبیت چنین شبکه‌ای این است که به صورت مجازی اینرسی اضافی فراهم شود. با استفاده از ذخیره سازی انرژی کوتاه‌مدت به اضافه یک اینورتر^۲ / کانورتر^۳ قدرت و یک مکانیزم کنترلی مناسب، می‌توان یک اینرسی مجازی برای تولیدات پراکنده / منابع انرژی تجدیدپذیر ایجاد کرد. این مفهوم به عنوان VSG یا ماشین سنکرون مجازی (VSM) شناخته می‌شود. سپس واحدها مشابه یک ژنراتور سنکرون عمل می‌کنند و مقدار اینرسی و ویژگی‌های میرایی ماشین‌های سنکرون معمولی را برای فواصل زمانی کوتاه‌مدت ارائه می‌دهند. در نتیجه، مفهوم اینرسی مجازی می‌تواند مبنایی برای حفظ سهم بزرگی از تولیدات پراکنده / منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های آینده باشد.

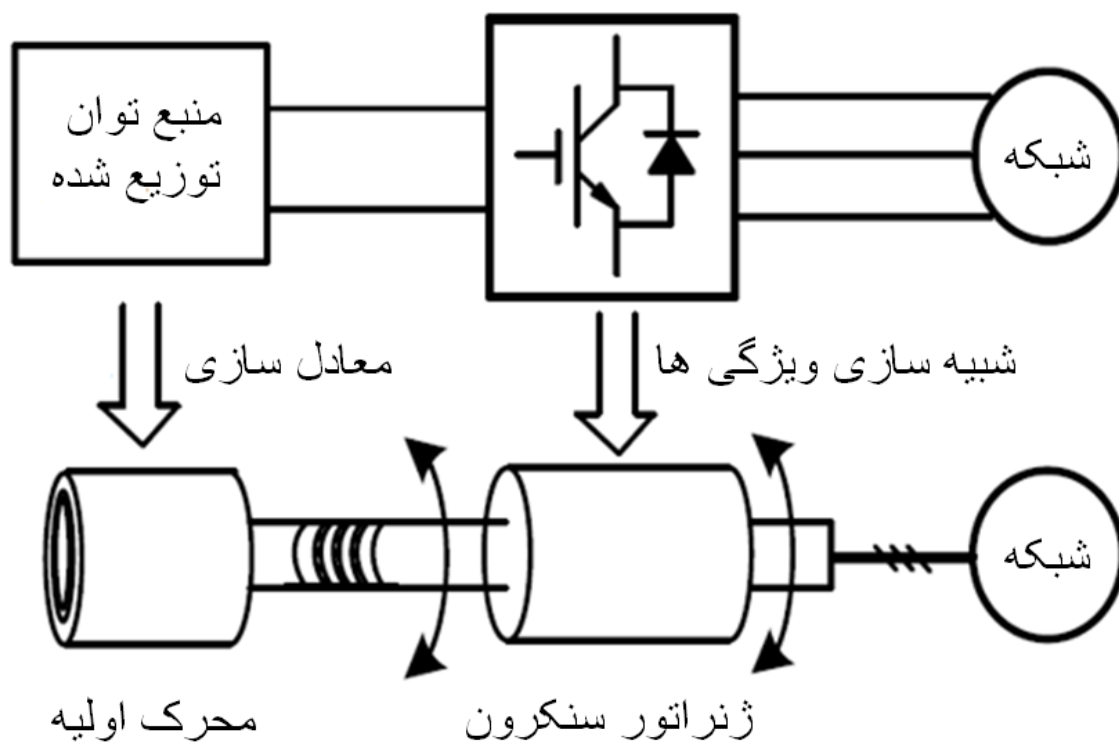
^۱ Damper Winding

^۲ Inverter

^۳ Converter

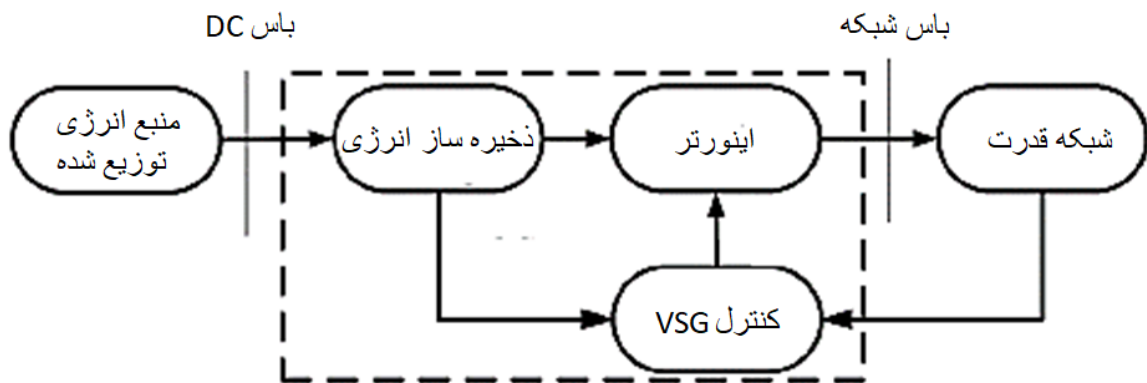
۲-۲ مفهوم VSG

شکل (۱-۲) مفهوم کلی یک VSG را نشان می‌دهد. منابع توان تولیدپراکنده مانند انرژی خورشیدی و بادی می‌توانند معادل یک محرک اولیه باشند. یک اینورتر منبع ولتاژ می‌تواند به‌عنوان یک ژنراتور سنکرون که خاصیت اینرسی و مشخصه افتی توان آن را تقلید کند استفاده شود. با توجه به اصل VSG، هر اینورتر متصل به شبکه توزیع می‌تواند به‌عنوان ژنراتور سنکرون در نظر گرفته شود، به‌گونه‌ای که روش و تئوری کنترل پایداری شبکه در مقیاس بزرگ با کنترل ریزشبکه با نفوذ زیاد منابع انرژی تجدیدپذیر، پیوند یابد [8].



شکل ۱-۲: مفهوم کلی یک VSG

VSG شامل سه جزء اصلی است که در نشان شکل (۲-۲) داده شده است: ذخیره‌ساز انرژی، اینورتر و یک مکانیزم کنترلی.



شکل ۲-۲: ساختار کلی یک VSG [9]

۲-۳ ذخیره‌سازی انرژی

ذخیره‌سازی یکی از سه قسمت اصلی تشکیل دهنده VSG می‌باشد. معمولاً از خازن‌ها برای ذخیره‌سازی انرژی در سیستم‌های VSG استفاده می‌شود. محل قرارگیری آن در قسمت منبع DC می‌باشد و اساس کار آن نیز ذخیره یا آزادسازی انرژی در هنگام اغتشاش است. به‌طوریکه، در هنگام افزایش تولید توان انرژی اضافی را در خود ذخیره می‌کند و در هنگام افزایش تقاضا مقداری از انرژی ذخیره شده خود را آزاد می‌کند. بدین صورت یک اینرسی مجازی برای مبدل‌های متصل به شبکه فراهم می‌شود.

۲-۴ اینورتر

یکی دیگر از سه قسمت اصلی تشکیل دهنده VSG اینورترها هستند. اینورترها مدارهایی هستند که DC را به AC تبدیل می‌کنند، به عبارتی توان را از منبع DC به یک بار AC انتقال می‌دهند [10]. ورودی

اینورترها می‌تواند باتری، سلول خورشیدی، پیل سوختی، و یا هر منبع جریان مستقیم دیگر باشد. در حال حاضر با پیشرفت نیمه هادی‌ها و قطعات کلیدزنی با سرعت بسیار بالا، تحول چشم‌گیری در بکارگیری از مبدل‌های الکترونیک قدرت شده است. این پیشرفت‌ها به خصوص در اینورترها، باعث بکارگیری راحت‌تر منابع تولیدپراکنده در سیستم‌های قدرت شده است و گرایش جهانی برای استفاده از این منابع تجدیدپذیر بیشتر شده است.

۱-۴-۲ کاربردهای اینورتر

مبدل توان DC به AC (اینورترها) نقش مهمی را در تحریک فرکانس متغیر، منابع برق اضطراری، انتقال توان DC ولتاژ بالا، تحریک ماشین‌های الکتریکی، سیستم‌های انتقال AC انعطاف پذیر، مورد استفاده در منبع توان DC (مانند باتری، پنل‌های خورشیدی یا سلول‌های سوختی) و... ایفا می‌کنند [11 و 12].

۲-۴-۲ ساختار اینورتر

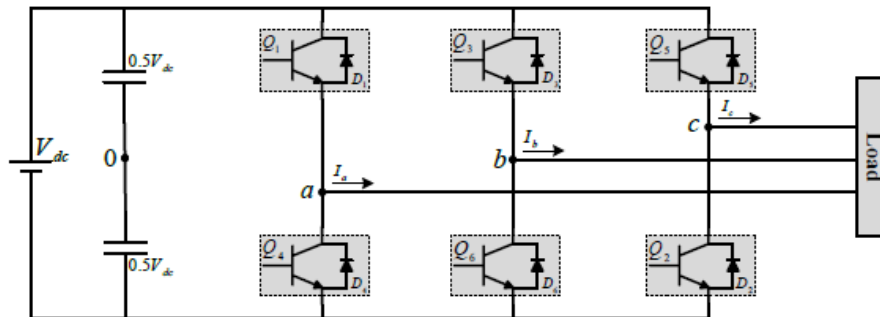
شکل (۲-۳) یک اینورتر سه فاز را نشان می‌دهد. هدف، تولید یک منبع ولتاژ سه فاز سینوسی با قابلیت کنترل فاز و دامنه و فرکانس می‌باشد [13]. اینورترها کلیدهای الکترونیکی هستند که می‌توانند خروجی را با کلیدزنی در فرکانس بالا و زمان وظیفه کلیدزنی هر کدام از کلیدها کنترل کنند. یکی از متداول‌ترین روش‌های کنترل اینورتر، مودولاسیون پهنای پالس سینوسی^۱ است.

در مودولاسیون پهنای پالس سینوسی همانطور که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است یک شکل موج مثلثی با فرکانس f_{Δ} با یک شکل موج سینوسی مرجع مقایسه می‌شود و نقاط قطع این دو شکل موج زمان‌های کلیدزنی هر کدام از این شش کلید را مشخص می‌کند. مثلاً در فاز a، اگر $V_c > V_{\Delta}$ باشد، Q1

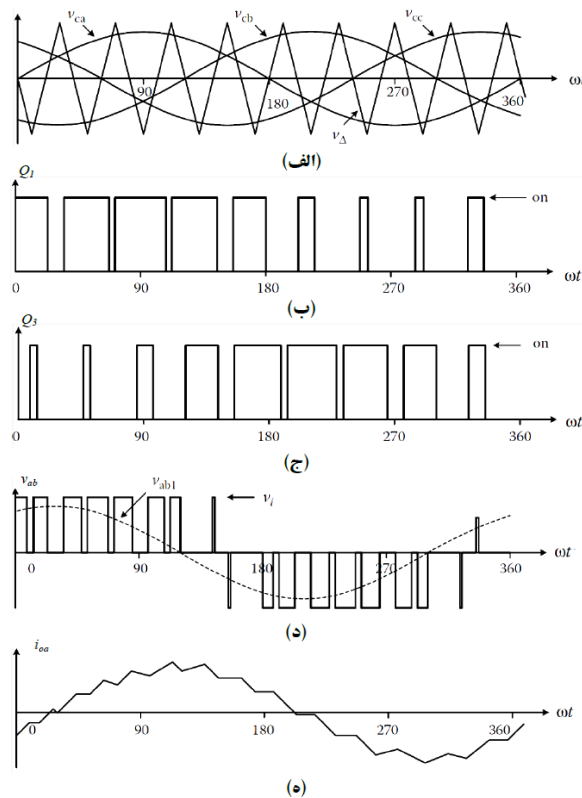
^۱ Sinusoidal Pulse Modulation (SPWM)

روشن و خاموش می شود و بالعکس. عملکرد کلیدهای دیگر در فازهای b و c به همین شکل می باشد.

همینطور در شکل (۴-۲) عملکرد کلیدها، ولتاژ و جریان خروجی اینورتر نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: شماتیک مداری یک اینورتر سه فاز

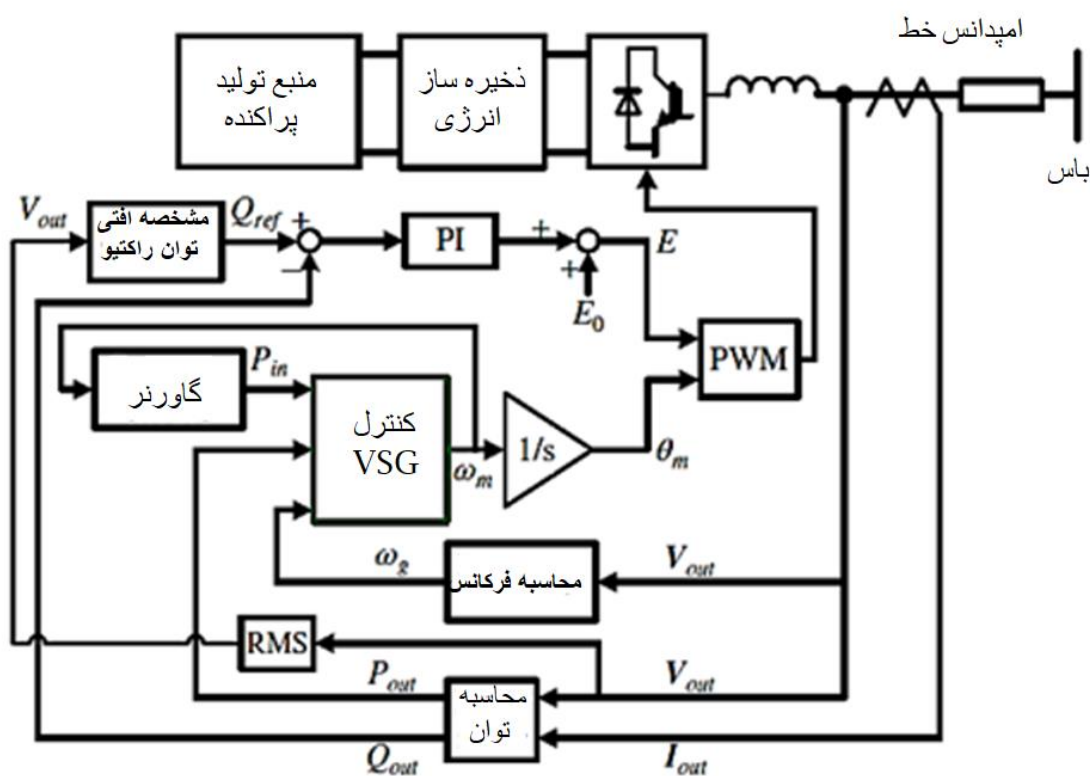


شکل ۲-۴: اینورتر منبع ولتاژ سه فاز: (الف) سیگنال های مرجع a,b,c و سیگنال حامل، (ب) حالت کلید ۱، (ج) حالت کلید ۳،

(د) ولتاژ خروجی اینورتر، (ه) جریان خروجی اینورتر

۵-۲ مکانیزم کنترلی یک VSG

VSG به عنوان یک رابط بین منبع اولیه (معمولا DC) و شبکه استفاده می‌شود. در بلوک کنترل VSG عموماً یک تابع دینامیکی شبیه به معادله نوسان^۱ ژنراتورهای سنکرون تعبیه شده است، که توان خروجی را بر اساس اندازه‌گیری‌های شبکه و میزان تغییرات آن‌ها تعیین می‌کند [14]. یک بلوک دیاگرام اساسی برای تحقق سیستم VSG در شکل (۵-۲) نشان داده شده است.



شکل ۵-۲: یک بلوک دیاگرام کلی برای سیستم VSG [15]

در این طرح، یک منبع تولید پراکنده با استفاده از یک اینورتر کنترل شده بر اساس مفهوم VSG به شبکه قدرت متصل شده است. یک VSG بهبود یافته در [16] ارائه شده است.

^۱ Swing Equation

۱-۵-۲ معادله نوسان ژنراتور سنکرون

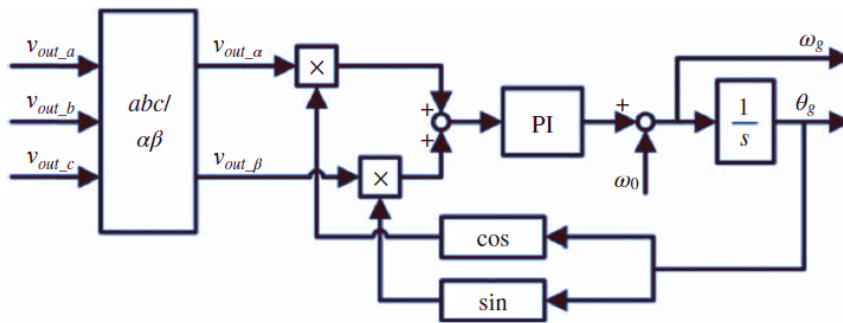
معادله نوسان معروف ژنراتورهای سنکرون به عنوان قلب سیستم VSG (بلوک کنترل VSG) استفاده می‌شود. معادله نوسان ذکر شده می‌تواند به شرح زیر باشد [17].

$$P_{in}(t) - P_{out}(t) = J\omega_m(t) \frac{d\omega_m(t)}{dt} + DP_{base} \frac{\omega_m(t) - \omega_g(t)}{\omega_0} \quad (1-2)$$

در اینجا P_{in} توان محور مجازی است که توسط گاورنر^۱ تعیین می‌شود، $P_{out}(t)$ توان خروجی اندازه‌گیری شده است، P_{base} توان مجاز واحد تولیدپراکنده است، J اینرسی مجازی است، D ضریب میرایی مجازی است، ω_m فرکانس زاویه‌ای روتور مجازی است، ω_g فرکانس زاویه‌ای نقطه‌ای است که در آن سنسور ولتاژ نصب شده است و ω_0 فرکانس زاویه‌ای نامی است.

۲-۵-۲ بلوک تشخیص فرکانس

فرکانس شبکه توسط یک بلوک تشخیص فرکانس شناسایی می‌شود. حلقه قفل فاز^۲ (PLL) می‌تواند به عنوان واحد تشخیص فرکانس استفاده شود. بلوک دیاگرام واحد PLL در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.



شکل ۶-۲: بلوک آشکارساز فرکانس (PLL) [1]

^۱ Governor

^۲ Phase Locked Loop

تبدیل مولفه‌های سه فاز به مولفه‌های $\alpha\beta$ از طریق ماتریس تبدیل $T_{abc}/\alpha\beta$ به شرح زیر است [1]:

$$\frac{T_{abc}}{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

تبدیل $\alpha\beta$ که با عنوان تبدیل کلارک هم شناخته می‌شود یک تبدیل ریاضی است که برای ساده‌سازی تحلیل مدار سه فاز استفاده می‌شود. ولتاژهای سه فاز روی محورهای a ، b و c با زمان تغییر می‌کنند و می‌توان آن‌ها را به صورت جبری به ولتاژهای دوفاز $\alpha\beta$ تبدیل کرد و سپس بر روی آن‌ها تحلیل انجام داد.

۳-۵-۲ بلوک محاسبه توان

در بلوک محاسبه توان، توان خروجی اکتیو و راکتیو به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{out} = v_{out-a}i_{out-a} + v_{out-b}i_{out-b} + v_{out-c}i_{out-c} \quad (3-2)$$

$$Q_{out} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[i_{out-a}(v_{out-b} - v_{out-c}) + i_{out-b}(v_{out-c} - v_{out-a}) + i_{out-c}(v_{out-a} - v_{out-b}) \right] \quad (4-2)$$

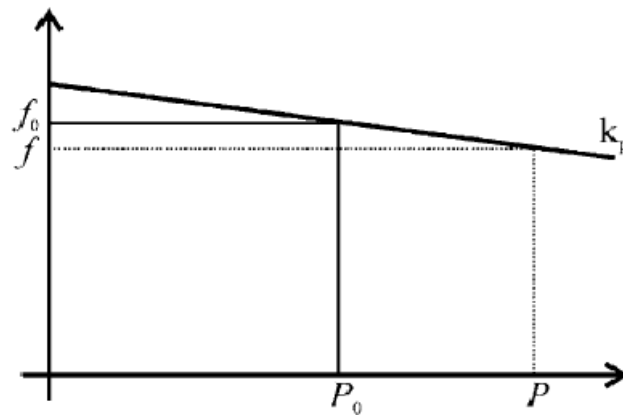
در اینجا، v_{out-a} و i_{out-a} ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده فاز a هستند و v_{out-b} و i_{out-b} ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده فاز b هستند و v_{out-c} و i_{out-c} ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده فاز c هستند.

مقدار RMS ولتاژ خروجی در بلوک RMS به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$v_{out} = \sqrt{v_{out-a}^2 + v_{out-b}^2 + v_{out-c}^2} \quad (5-2)$$

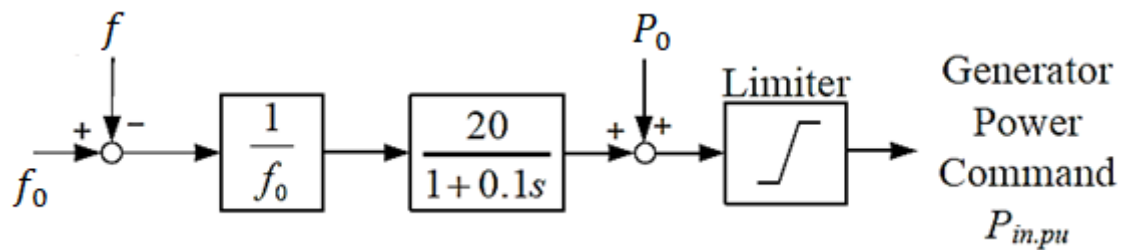
۴-۵-۲ بلوک مدل گاورنر

بلوک مدل گاورنر یک کنترل کننده مشخصه افقی $\omega - p$ است. مشخصه افقی $\omega - p$ در شکل (۷-۲) آورده شده است و رابطه (۶-۲) قانون مشخصه افقی $\omega - p$ را بیان می کند که در آن f_0 فرکانس نامی، k_p ضریب افقی توان اکتیو/فرکانس و P_0 نیز نقطه تنظیم شده برای توان اکتیو می باشد. با توجه به معادله (۶-۲) هرگاه توان اکتیو تولیدی از مقدار پیش فرض P_0 کم یا زیاد شود کنترل کننده فرکانس متناسب با این اختلاف زاویه توان را تغییر می دهد تا از انحراف جلوگیری کند [18]. شکل (۸-۲) جزئیات مدل گاورنر را نشان می دهد که در آن $\frac{1}{f_0}$ ضریب مشخصه افقی $\omega - p$ و S ثابت زمانی تاخیر گاورنر استفاده شده برای شبیه سازی پاسخ مکانیکی به تاخیر افتاده یک گاورنر واقعی ژنراتور سنکرون می باشد. رنج محدود کننده خروجی برای P_{in} ، -0.5 تا 1.05 pu است.



شکل ۷-۲: مشخصه افقی $\omega - p$

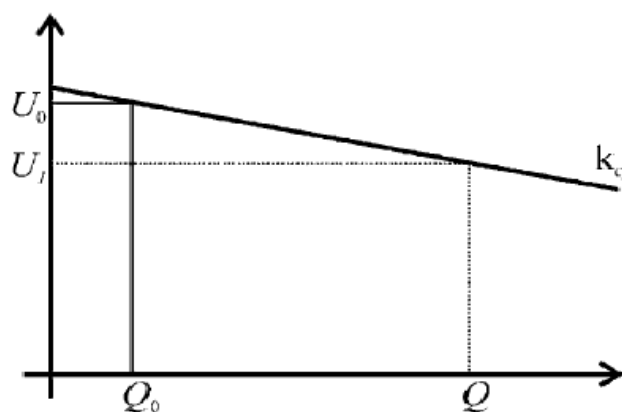
$$f - f_0 = -k_p(p - p_0) \quad (۶-۲)$$



شکل ۲-۸: بلوک مدل گاورنر [19]

۵-۵-۲ بلوک کنترل افقی $V-Q$

این بلوک یک کنترل کننده مشخصه افقی $V-Q$ است، مشخصه افقی $V-Q$ در شکل (۲-۹) آورده شده است و همچنین رابطه (۲-۷) قانون مشخصه افقی $V-Q$ را بیان می کند که در آن U_0 ولتاژ نامی، Q_0 نقطه تنظیم شده توان راکتیو و K_q ضریب مشخصه افقی ولتاژ/توان راکتیو می باشد. مشابه با قانون افقی $\omega-p$ هرگاه توان راکتیو تولیدی از مقدار تنظیم شده Q_0 کمتر یا بیشتر شود کنترل کننده افقی متناسب با این انحراف ولتاژ را تغییر می دهد تا از انحراف جلوگیری کند.



شکل ۲-۹: مشخصه افقی $V-Q$

$$U - U_0 = -K_q(Q - Q_0) \quad (۲-۷)$$

بلوک مدل گاورنر قانون کنترل افقی خطی را بین توان اکتیو و فرکانس ایجاد می‌کند و بلوک کنترل افقی Q-U قانون کنترل افقی خطی را بین توان راکتیو و ولتاژ ایجاد می‌کند. کنترل VSG مانند منبع ولتاژ عمل می‌کند، پس می‌توان آن را به‌عنوان یک کنترل‌کننده پشتیبان شبکه مبتنی بر ولتاژ منبع به‌جای آورد. به‌طور مشابه با دیگر کنترل‌کننده‌های شبکه مبتنی بر ولتاژ منبع، اینورتر مبتنی بر کنترل VSG می‌تواند به‌طور جداگانه، به‌صورت موازی و حتی به‌مستقیم شبکه متصل شود، و هیچ تغییر کنترلی در طول عملیات حالت گذرا مورد نیاز نیست. بنابراین، کنترل VSG را می‌توان به‌عنوان یک کنترل‌کننده پشتیبان شبکه مبتنی بر منبع ولتاژ ارتقا داد که قادر به تامین اینرسی پشتیبان می‌باشد.

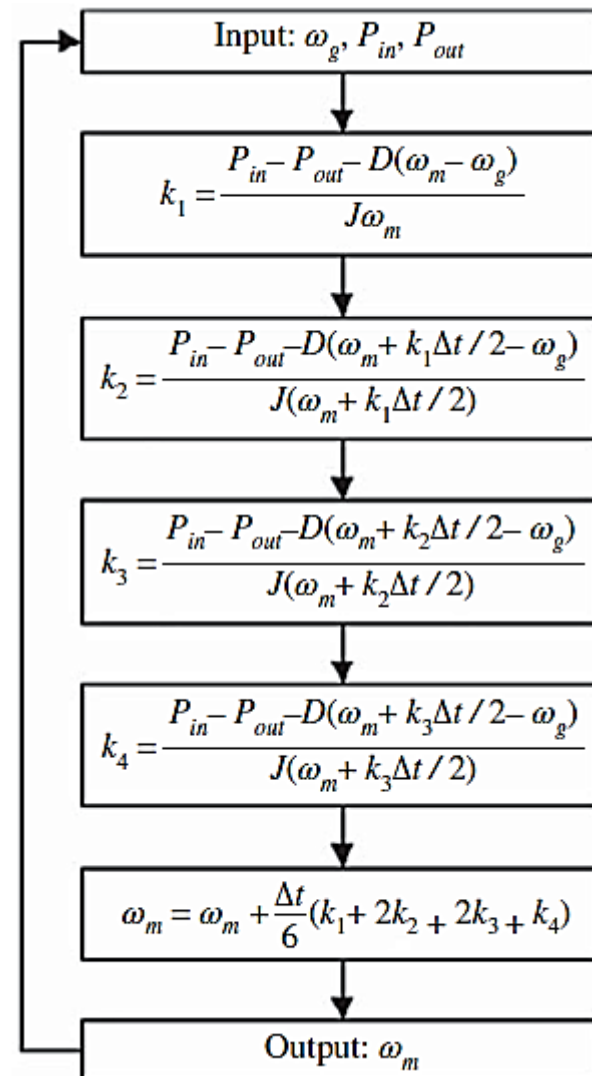
یک کنترل‌کننده (PI) برای ردیابی توان راکتیو خروجی به مقدار مرجع Q_{ref} تولید شده توسط کنترل افقی Q استفاده می‌شود. به‌منظور کاهش تاثیر ریب‌ها در توان خروجی اندازه‌گیری شده، یک فیلتر پایین‌گذر ۲۰ هرتزی برای Q_{out} اعمال می‌شود. ولتاژ خروجی اینورتر مدولاسیون پهنای پالس (PWM) از مجموع خروجی کنترل‌کننده PI و ولتاژ نامی E_0 بدست می‌آید. عملکرد این کنترل‌کننده PI همانند رگولاتورهای^۱ توان راکتیو اتوماتیک ژنراتور سنکرون است که در آن نیرو محرکه الکتریکی (EMF) با تنظیم شار میدان کنترل می‌شود. بنابراین، ولتاژ خروجی اینورتر PWM را می‌توان به‌عنوان emf مجازی VSG در نظر گرفت.

با داشتن پارامترهای ضروری، معادله (۲-۱) را می‌توان توسط محاسبات عددی مانند روش رانگ-کوتا^۲ حل کرد. روش محاسبه ω_m با استفاده از روش رانگ-کوتا در شکل (۲-۱۰) ارائه شده است. پس از محاسبه ω_m لحظه‌ای و عبور از یک انتگرال‌گیر، زاویه فاز مکانیکی θ_m مجازی تولید می‌شود. همانطور که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است، کنترل‌کننده PI سیگنال E را تولید می‌کند که مرجع ولتاژ است و

^۱ Regulator

^۲ Runge – Kutta

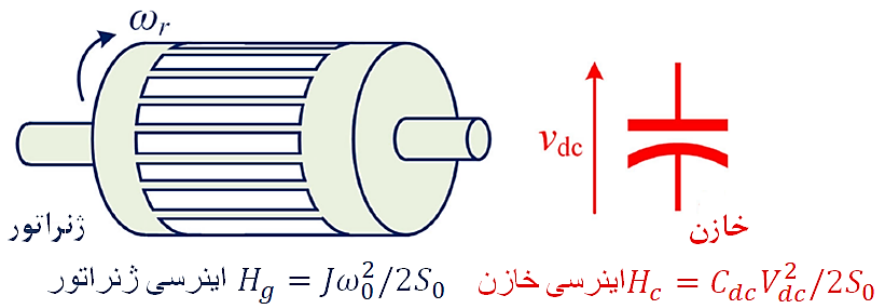
می تواند برای تعیین ولتاژ و توان راکتیو در ترمینال اینورتر استفاده شود. زاویه فاز و مرجع ولتاژ برای تولید پالس های PWM برای اینورتر استفاده می شود.



شکل ۲-۱۰: محاسبه ω_m توسط روش Runge-Kutta [1]

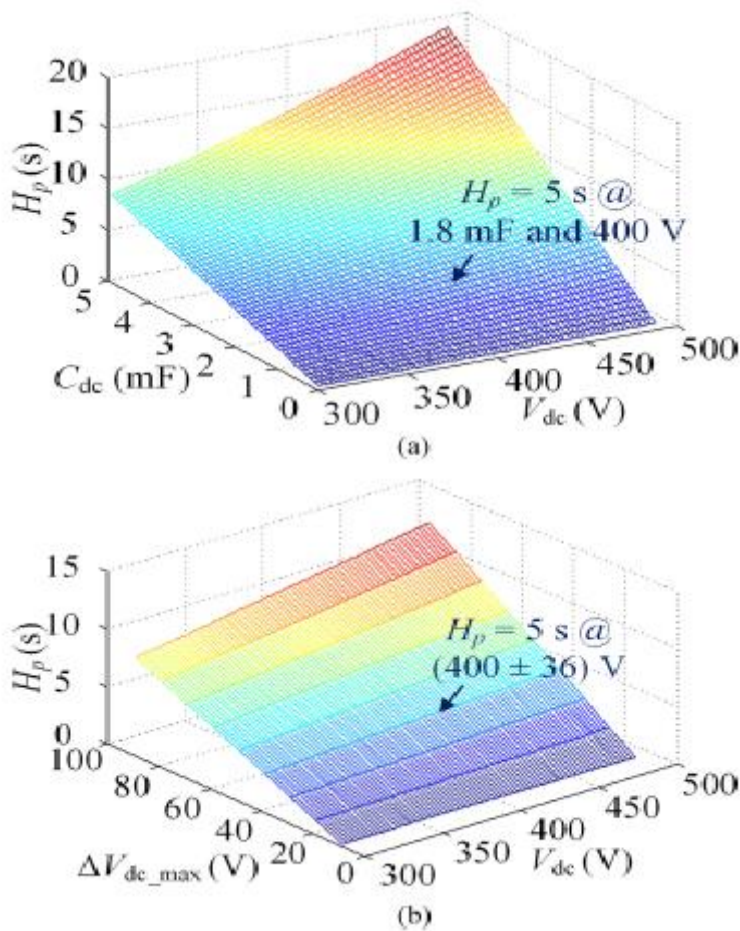
انتخاب مقدار مناسب برای J و D یک مسئله چالش برانگیز خواهد بود. اینرسی به معنای حساسیت فرکانس شبکه نسبت به عدم تعادل میان تولید و مصرف است [20]. حداکثر اینرسی مجازی متناسب با توان نامی مبدل تقسیم بر حداکثر تغییرات فرکانس است [21]. در شبیه سازی یک ماشین سنکرون، J نشان دهنده مشخصات اینرسی است که به صورت $J = 2HS_0 / \omega_0^2$ محاسبه می شود که H ثابت اینرسی ماشین است، S_0 توان ظاهری نامی ماشین است و ω_0 فرکانس سیستم است. پارامتر H طول

دوره زمانی را تعیین می‌کند که در آن ماشین قادر است بار نامی را با استفاده از انرژی ذخیره شده در جرم دوار تامین کند. یک سیستم با H بزرگتر، ثابت زمانی بزرگتر، پاسخ کندتری را ارائه می‌دهد با وجود انحراف فرکانس کمتر بعد از یک اغتشاش، هرچند که به اندازه ماشین و توان بستگی دارد، برای ماشین‌های سنکرون معمولی، H بین ۲ تا ۱۰ ثانیه متغیر است [22]. شکل (۲-۱۱) یک معادل‌سازی بین اینرسی ژنراتور سنکرون و اینرسی خازن را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱: معادل‌سازی میان اینرسی ژنراتور سنکرون و خازن [23]

به طور مشابه، ثابت اینرسی خازن به صورت نسبت انرژی ذخیره شده در خازن ($C_{dc}V_{dc}^2/2$) به توان نامی مبدل تعریف می‌شود. محدوده اینرسی مجازی به ظرفیت VSG بستگی دارد و توسط روش‌های تحلیل پایداری و مدل سیگنال کوچک حلقه کنترل توان/فرکانس VSG مشخص می‌شود. شکل (۲-۱۲) نشان‌دهنده اینرسی مجازی متناسب با مقدار خازن، مقدار نامی ولتاژ DC و نرخ تغییرات آن است. مقدار اینرسی مجازی با افزایش مقدار خازن، ولتاژ DC و نرخ تغییرات آن افزایش می‌یابد. این امکان وجود دارد که در یک VSG اینرسی بیشتری نسبت به ژنراتورهای سنکرون حاصل شود. لازمه این امر خازن بزرگتر و V_{dc} بزرگتر است که هزینه سیستم را افزایش می‌دهد [23].



شکل ۲-۱۲: منحنی اینرسی مجازی H_p متناسب با مقدار خازن، ولتاژ DC و نرخ تغییرات آن

در مورد تنظیم فرکانس، J و D باید طوری انتخاب شوند که VSG حداکثر توان اکتیو خود را هنگامی که حداکثر تغییر فرکانس و نرخ تغییر رخداد فرکانس مشخص شده، مبادله کند. J و D بزرگتر بدان معنی است که توان بیشتری برای تزریق یا جذب برای انحراف فرکانس و نرخ تغییر فرکانس خواهد بود. با این حال، متقابلاً، مقادیر بزرگ J و D با مقدار مجاز توان منجر به یک گردش فرکانس کوچک می‌شود. رابطه میان ضریب میرایی و اینرسی با نسبت میرایی می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{X}{J\omega_n EU}} \quad (۸-۲)$$

معمولاً بهترین پاسخ یک سیستم با نسبت میرایی ۰.۷۰۷ بدست می‌آید.

اینورترها ظرفیت اضافه بار یک ماشین سنکرون را ندارند و ممکن است تحت اضافه بار شدید دچار وقفه کاری شوند. برخلاف ژنراتورهای سنکرون، پارمترهای سیستم VSG در طی عملکرد طبیعی قابل تغییر هستند. به عبارت دیگر، می‌توان پارمترهای VSG را متناسب با شرایط مختلف کاری برای حصول یک پاسخ بهتر و سریع‌تر تغییر داد حتی تحت نقاط کاری خاص برای کاهش بهتر نوسانات VSG می‌توان از یک اینرسی منفی نیز استفاده کرد [24]24.

همانطور که قبلاً ذکر شد، افزایش J باعث افزایش مقدار اینرسی معادل برای VSG می‌شود؛ با این حال، یک محدودیت وجود دارد که عمدتاً توسط ظرفیت اینورتر و دقت PLL اعمال می‌شود. دقت در ردیابی فرکانس بستگی به عملکرد PLL دارد. بنابراین، مقدار بهینه در رابطه (۲-۱) را می‌توان با یک مصالحه بین اینرسی مجازی، ظرفیت اضافه بار اینورتر و ویژگی‌های PLL بدست آورد [25]. ظرفیت خازن باید با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند محدوده وسیعی از ناعادلی‌ها را در شبکه پوشش دهد.

۶-۲ کنترل اینرسی مجازی

معادله نوسان زیر را در نظر بگیرید:

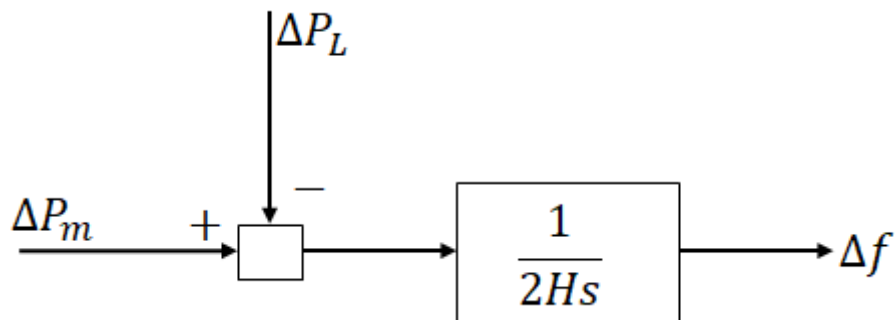
$$\Delta P_m(t) - \Delta P_l(t) = 2H \frac{d\Delta f(t)}{dt} + D\Delta f(t) \quad (9-2)$$

در اینجا، $\Delta P_m(t)$ تغییر پرینیتی توان مکانیکی، $\Delta P_l(t)$ تغییر پرینیتی توان بار، H ثابت اینرسی روتور، D ضریب میرایی روتور و $\Delta f(t)$ انحراف فرکانس است. باتوجه به این معادله می‌توان گفت هرچه مقدار اینرسی بیشتر باشد به ازای یک عدم تعادل میان توان تولیدی و توان بار نرخ تغییرات فرکانس کمتر خواهد بود. کنترل‌کننده‌ای که بخش اینرسی روتور ژنراتورهای سنکرون را پیاده‌سازی می‌کند کنترل اینرسی مجازی می‌گویند. با صرف نظر از ضریب میرایی، معادله نوسان به صورت زیر نوشته می‌شود که در

آن فقط اینرسی لحاظ شده است.

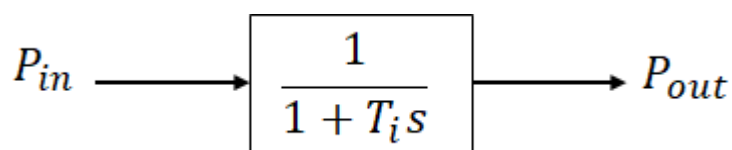
$$\Delta P_m(t) - \Delta P_l(t) = 2H \frac{d\Delta f(t)}{dt} \quad (۱۰-۲)$$

بلوک دیاگرام این معادله به صورت شکل (۱۳-۲) نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۳-۲: بلوک دیاگرام معادله نوسان بدون ضریب میرایی

همانطور که قبلاً ذکر شد منابع تولید پراکنده فاقد اینرسی هستند و برای ممانعت از انحراف فرکانس لازم است اینرسی را به طور مجازی برای این گونه منابع فراهم کنیم. با ترکیب یک منبع ذخیره ساز انرژی و اینورتر و یک سیستم کنترلی مناسب می‌توان اینرسی را به شکل مجازی فراهم کرد. بلوک دیاگرام یک اینورتر به صورت شکل (۱۴-۲) نشان داده می‌شود که در آن T_i ثابت زمانی عملکرد اینورتر است که می‌تواند یک تا چند سیکل کار باشد.

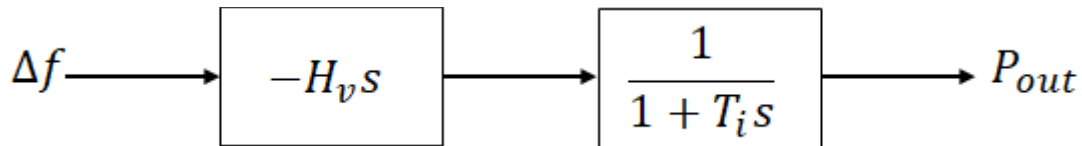


شکل ۱۴-۲: بلوک دیاگرام یک اینورتر

برای مدلسازی اینرسی ژنراتورهای سنکرون در یک اینورتر لازم است توان تولیدی اینورتر معکوس با نرخ تغییرات فرکانس تولید شود. یعنی:

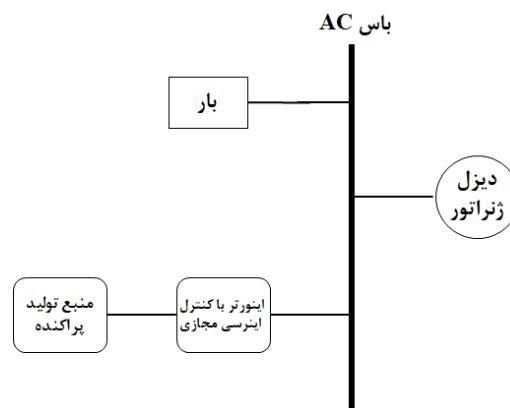
$$P_{in} = -H_v \frac{d\Delta f}{dt} \quad (۱۱-۲)$$

در این رابطه H_v اینرسی مجازی اینورتر است. در نهایت بلوک دیاگرام اینرسی مجازی به صورت شکل (۱۵-۲) بدست می‌آید.

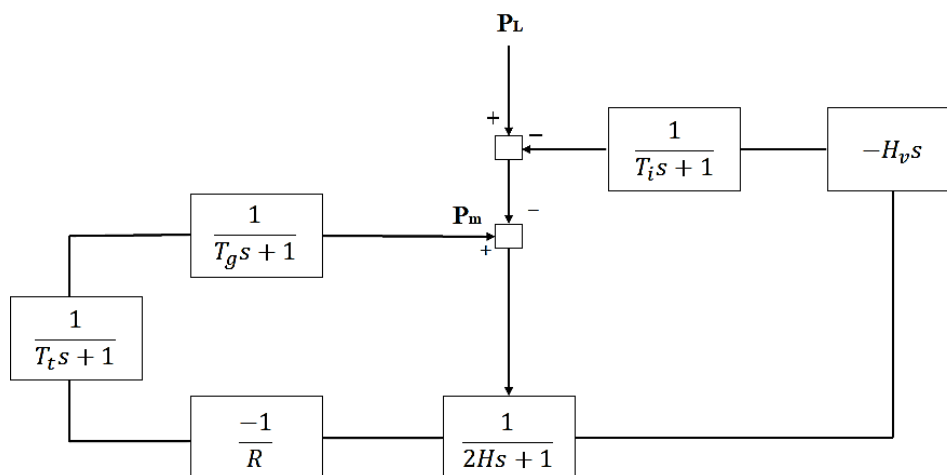


شکل ۱۵-۲: بلوک دیاگرام اینرسی مجازی در یک اینورتر

برای بررسی عملکرد کنترل اینرسی مجازی، آن را در ریزشبه ساده شکل (۱۶-۲) تحت تغییر ۱۰ درصد بار مصرفی مورد آزمایش قرار دادیم. بلوک دیاگرام این ریزشبه به صورت شکل (۱۷-۲) نمایش داده می‌شود و نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۸-۲) آورده شده است. پارامترهای شبیه‌سازی این بخش در جدول (۱-۲) آورده شده است.

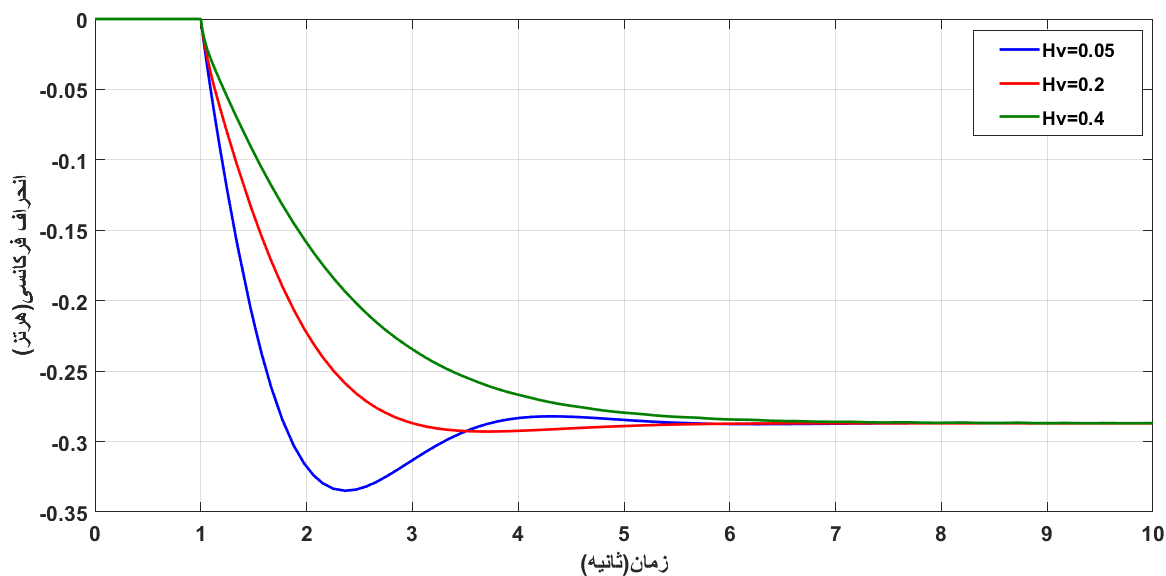


شکل ۱۶-۲: ریزشبه ساده برای بررسی عملکرد کنترل اینرسی مجازی



شکل ۲-۱۷: بلوک دیاگرام ریزشبهه فوق
جدول ۲-۱: پارامترهای شبیه‌سازی ریزشبهه فوق

پارامتر	مقدار
T_g	۰,۰۸
T_t	۰,۴
R	۳
$2H$	۰,۱۶
D	۰,۰۱۵

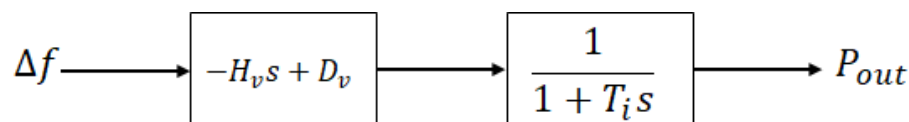


شکل ۲-۱۸: انحراف فرکانسی برای ۱۰ درصد تغییر بار در ریزشبه

همانطور که گفته شد هرچه مقدار اینرسی بیشتر باشد به ازای یک عدم تعادل تولید و مصرف انحراف فرکانسی کمتر خواهد بود که این موضوع در شکل (۲-۱۸) به وضوح مشخص است.

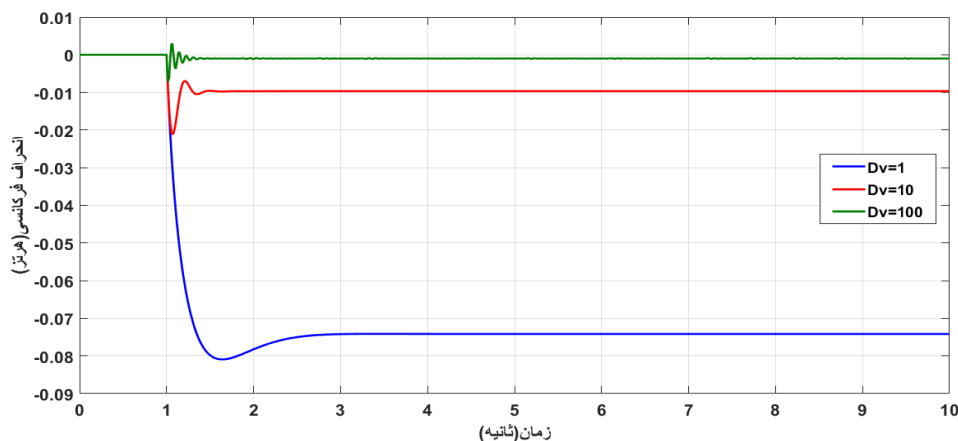
۲-۷ کنترل روتور مجازی

پارمتر دیگری که در معادله نوسان وجود دارد و می‌تواند بر پاسخ فرکانسی تأثیر بگذارد ضریب میرایی است. هر چه ضریب میرایی بیشتر باشد خطای حالت ماندگار فرکانس در صورت رخداد ناتعادلی کمتر خواهد بود. می‌توان گفت اینرسی در کاهش انحراف فرکانس و ضریب میرایی در کاهش نوسانات فرکانس مفید هستند. اگر در کنترل اینورتر مبتنی بر VSG علاوه بر اینرسی ضریب میرایی نیز در نظر گرفته شود کنترل کننده روتور مجازی تشکیل خواهد شد. در نتیجه بلوک دیاگرام روتور مجازی همانند شکل (۲-۱۹) نمایش داده خواهد شد.



شکل ۲-۱۹: بلوک دیاگرام روتور مجازی

برای بررسی عملکرد کنترل روتور مجازی این کنترل کننده را به جای کنترل اینرسی مجازی در ریز شبکه فوق و تحت همان سناریو ۱۰ درصد تغییر بار و به ازای ۳ مقدار مختلف D مورد آزمایش قرار خواهیم داد. شکل (۲-۲۰) نتیجه شبیه سازی را نشان می دهد. همانطور که گفته شد به ازای ضریب میرایی بیشتر خطای حالت ماندگار فرکانس کمتر می شود که این موضوع در شکل (۲-۲۰) نیز کاملاً مشخص است.



شکل ۲-۲۰: انحراف فرکانس ریز شبکه با ضرایب مختلف میرایی

در راستای مطالعات تحقیقاتی مربوطه، یک مرور کلی از توپولوژی های مختلف VSG به همراه شرح مفصلی از ساختار آن ها صورت گرفته است. روش های تحلیل پایداری VSG مانند پایداری سیگنال کوچک و پایداری گذرا نیز به شیوه های جامع مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مشکلات VSG، مدلسازی - های آن، بهبود پایداری و مسیرهای تحقیقات آینده نیز مطرح گردیده است [26].

شبکه های ضعیف دارای امپدانس شبکه بزرگی هستند که ممکن است مبدل های قدرت متصل به شبکه سه فاز تحت تاثیر پدیده رزونانس ناشی از فیلترهای غیرفعال مرتبه بالا [27]، اتصال بین چند مبدل [28] و تاثیر حلقه قفل فاز بر حلقه کنترل جریان [29] ناپایدار شوند. علاوه بر دلایل ذکر شده، در [30] نشان داده شده است که اتصال بین حلقه های کنترل (به عنوان مثال، سیستم های کنترل مرجع dq) و اپراتور دیفرانسیل مسئول بی ثباتی مبدل های قدرت متصل به شبکه با اینرسی مجازی از خازن ها هستند. برای مقابله با این مسئله ناپایداری، یک کنترل اینرسی مجازی اصلاح شده برای کاهش تاثیر عملگر دیفرانسیل

پیشنهاد شده و به این ترتیب اثر اتصال تا حد زیادی کاهش یافته است و به خوبی پایداری مبدل‌های قدرت سه‌فاز متصل به شبکه ضعیف حفظ شد. یک کنترل اینرسی مجازی برای افزایش اینرسی ریزشبکه DC و کاهش نرخ تغییرات ولتاژ DC در [31] پیشنهاد شده که این کنترل‌کننده یک حلقه اینرسی مرتبه اول است که به ترتیب در مبدل متصل به شبکه، مبدل متصل به باتری و مبدل متصل به ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم^۱ اجرا شده است. این کنترل‌کننده برای مبدل‌های AC/DC و DC/DC کارایی داشته و در مواقعی که نوسان ولتاژ رخ می‌دهد این کنترل‌کننده می‌تواند به خوبی به بهبود اینرسی شبکه کمک کند. برای مسئله فقدان اینرسی، یک روش افزایش اینرسی مبتنی بر مشتق فرکانس برای سیستم‌های مجهز به باتری در [32] ارائه شده است. به‌طوریکه با استفاده از رابطه مشتق زمانی فرکانس شبکه و مراجع توان‌های اکتیو مبدل‌های قدرت، اینرسی مجازی را می‌توان فراهم کرد.

همانطور که گفته شد اینرسی مجازی را می‌توان توسط ذخیره سازی انرژی کوتاه مدت فراهم کرد. یکی از ابزارهای ذخیره انرژی پست‌های شارژ^۲ می‌باشند. بر این اساس، نقش حامل الکتریکی^۳ پست‌های شارژ برای پشتیبانی از فرکانس ریزشبکه مستقل در [33] مطالعه شده که در آن وسیله‌های حامل الکتریکی قرار گرفته در پست شارژ به عنوان یک سیستم ذخیره انرژی برای ریزشبکه عمل می‌کنند. هرگاه عدم تعادل بین تولید و مصرف در ریزشبکه اتفاق بی‌افتد، توان مورد نیاز توسط پست شارژ رها یا جذب می‌شود تا از انحراف فرکانس جلوگیری شود. این جریان دو طرفه بین ریزشبکه و پست شارژ توسط مکانیزم کنترل VSG صورت می‌گیرد.

پاسخ اینرسی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم مبتنی بر سیستم تبدیل انرژی باد^۴ با کنترل VSG در

^۱ Permanent Magnet Synchronous Generators

^۲ Charging Station

^۳ Electric Vehicle

^۴ Based Wind Energy Conversion System

[34] مورد بررسی قرار گرفته است و تفاوت بین سیستم تبدیل انرژی بادی با کنترل اینرسی مجازی و ژنراتور سنکرون مورد مطالعه قرار گرفته است. ویژگی‌های پاسخ اینرسی سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیسی دائم با طرح‌های مختلف VSG در [35] مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار گرفته است.

نوسانات را می‌توان از طریق تنظیم اینرسی و ضریب میرایی، حذف کرد. بنابراین، برای بررسی تأثیرات پارامترهای اختلال بر روی توان اکتیو و فرکانس برای یک VSG، می‌توان مدل سیگنال کوچک گرفته و عملکردهای دینامیکی را مورد بررسی قرار داد. بر این اساس، یک استراتژی کنترل تطبیقی در [36] ارائه شده است که در آن ضریب میرایی و اینرسی مجازی را به صورت انعطاف پذیری تغییر می‌دهد تا عملکرد دینامیکی بهتری حاصل شود. در [34] تجزیه و تحلیل VSG مبتنی بر تابع تبدیل صورت گرفته است که می‌تواند مبنایی برای طراحی عملکرد گذرا و حالت پایدار VSG باشد و برای توصیف تغییرات توان اکتیو و راکتیو در پاسخ به تغییرات منابع و اغتشاشات فرکانسی در شبکه دو مدل سیگنال کوچک و سیگنال بزرگ ایجاد شده است. انتخاب ضریب افتی و اینرسی مجازی به طور واضح از طریق الزامات رعایت معیارهای عملکرد گذرا مانند میرایی، اضافه جهش و زمان نشست مرتبط هستند. یک ریزشبکه با چند VSG در [38] معرفی شده است و انحرافات زاویه ولتاژ^۱ ژنراتورها نسبت به زاویه مرکز اینرسی^۲ به عنوان یک ابزار برای ارزیابی پایداری گذرای ریزشبکه چند VSG تعریف شده است. سپس، بهینه سازی اجتماع ذرات^۳ برای تنظیم پارامترهای واحدهای VSG به منظور دستیابی به دو هدف انجام شده است: اول برای داشتن یک گذرای صاف پس از یک اغتشاش، و دوم برای حفظ انحرافات زاویه ولتاژ ژنراتورها در یک محدوده خاص. علاوه بر این، یک طرح دیگر به نام اینرسی متناوب برای VSG ریزشبکه برای مهار سریع نوسانات

^۱ Voltage Angle Deviations

^۲ Angle of The Center of Inertia

^۳ Particle Swarm Optimization (PSO)

و بهبود پایداری گذرا پس از یک اغتشاش بزرگ ارائه شده است. علاوه بر این، تحت شرایط خطا نیز قرار گرفت که الگوریتم PSO پایداری سیستم را با تنظیم صحیح پارامترهای VSG حفظ کرد در حالی که VSG با پارامترهای ثابت در شرایط خطا ناپایدار شدند. همچنین الگوریتم اینرسی متناوب در تمامی آزمون‌ها از جمله خطا، تغییر توان تولید و بار پایداری سیستم را به خوبی حفظ کرد.

یکی از مسائل بحث برانگیز در سیستم‌های قدرت نوسانات فرکانس پایین می‌باشد. بر این اساس، در [39] به بررسی چگونگی تاثیر VSG بر روی نوسانات فرکانس پایین^۱ در سیستم‌های قدرت پرداخته شده است. با یک طراحی کنترلی مناسب، VSGها می‌توانند گشتاور میرایی^۲ مثبت قابل ملاحظه‌ای را برای میرا کردن نوسانات فرکانس پایین در شبکه‌های قدرت به طور موثر فراهم کنند. منحصرأ، با استفاده از تحلیل گشتاور میرایی، تأثیرات امپدانس مجازی^۳ و آشکارساز فرکانس شبکه (به عنوان مثال، حلقه فاز قفل شده) به طور دقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند تا دستورالعمل‌های طراحی برای میرایی بهتر نوسانات فرکانس پایین را ارائه دهند. PLL که برای تشخیص فرکانس شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد، اثرات میرایی منفی بر نوسانات فرکانس پایین دارد. این اثر را می‌توان با افزایش اندوکتانس مجازی با کاهش پهنای باند PLL کاهش داد. روش جبران فاز راه حل مناسبی برای کاهش پهنای باند PLL است.

۸-۲ جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا مقدمه‌ای بر مشکلات ناشی از کمبود اینرسی در شبکه‌های نو و نحوه جبران آن توسط VSG گفته شد. VSGها از سه بخش اصلی اینورتر، مکانیزم کنترلی و ذخیره‌ساز انرژی تشکیل شده‌اند. مبحث اصلی در خصوص VSG تنظیم فرکانس در هنگام وقوع اغتشاشات است که این کار توسط تخلیه

^۱ Low-Frequency Oscillations

^۲ Damping Torque

^۳ Virtual Impedance

یا آزاد کردن انرژی توسط ذخیره‌ساز انرژی صورت می‌گیرد. همچنین یک سیستم VSG عمومی در نظر گرفته شد و تمامی قسمت‌های کاربردی آن به‌طور خلاصه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در فصل بعدی تاثیر دو پارامتر کلیدی در معادله نوسان یعنی اینرسی و ضریب میرایی در عملکرد دینامیکی VSG مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل ۳ : تحلیل تاثیر ضریب میرایی و اینرسی بر عملکردهای دینامیکی

VSG

۱-۳ مقدمه

در این فصل به تحلیل تاثیر دو پارامتر اساسی ضریب میرایی و اینرسی مجازی در VSG پرداخته خواهد شد. با تغییر این دو پارامتر در یک محدوده مجاز می‌توان به طیف وسیعی از عملکردهای دینامیکی مختلف VSG دست یافت. بنابراین، تحلیل دینامیکی VSG متناسب با تغییرات این دو پارامتر خالی از لطف نیست.

اینرسی موجود در روتور ژنراتورهای سنکرون همانند یک ذخیره‌ساز انرژی عمل می‌کند که انرژی را می‌تواند در زمان عدم تعادل ذخیره یا آزاد کند تا از انحراف فرکانس جلوگیری شود. در یک سیستم VSG اینرسی توسط خازن متصل به باس DC تامین می‌شود. رابطه (۱-۳) بیانگر اینرسی ماشین سنکرون می‌باشد که H ثابت اینرسی، P_0 توان ظاهری نامی دستگاه و ω_0 فرکانس نامی سیستم می‌باشد. پارامتر H بیان کننده مدت زمانی است که ماشین می‌تواند بار نامی را توسط انرژی ذخیره شده در روتور تامین کند.

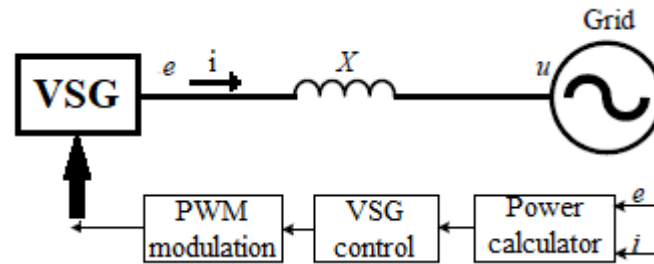
$$J = \frac{2HS_0}{\omega_0^2} \quad (1-3)$$

ضریب میرایی نشان‌دهنده مشخصه میرایی فرکانس مطابق با تغییر توان اکتیو است یا به عبارتی دیگر میزان وابستگی توان اکتیو به فرکانس می‌باشد، در نتیجه به صورت $\Delta P / \Delta f$ تعریف می‌شود.

۲-۳ اصول کار یک VSG

شکل (۱-۳) نشان‌دهنده یک VSG متصل به شبکه است. e ، u ، X و i به ترتیب نشان‌دهنده ولتاژ ترمینال VSG، ولتاژ شبکه، امپدانس خط و جریان خروجی VSG هستند. در اینجا سیگنال‌های ولتاژ و جریان خروجی VSG که e و i هستند برای محاسبه توان به واحد محاسبه توان رفته و سپس سیگنال توان اکتیو بدست آمده در این قسمت به واحد کنترلی که مبتنی بر سازوکار VSG می‌باشد هدایت می‌شود. سیگنال

خروجی بدست آمده از قسمت کنترل به واحد PWM رفته تا سیگنال‌های کلیدزنی را برای اینورتر صادر کند.



شکل ۳-۱: شماتیک مداری VSG مورد مطالعه [36]

در فصل پیشین گفته شد که بلوک کنترل VSG معادله نوسان ژنراتورهای سنکرون را پیاده‌سازی می‌کند که مجدداً به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P_0 - P_e + D_p(\omega_0 - \omega) = J\omega \frac{d\omega}{dt} \approx J\omega_n \frac{d\omega}{dt} \quad (2-3)$$

برای سادگی، ω_0 تقریباً برابر با ω_n فرض می‌شود. در این پایان‌نامه مطالعه بر روی شبکه ۵۰ هرتز صورت گرفته است پس $\omega_n = 2 * \pi * 50 \frac{rad}{s}$ می‌باشد.

۳-۳ مدل‌سازی یک VSG

باتوجه به مفاهیم سیستم قدرت، رابطه بین زاویه توان δ ، ω_0 و ω به صورت (۳-۳) بیان می‌شود:

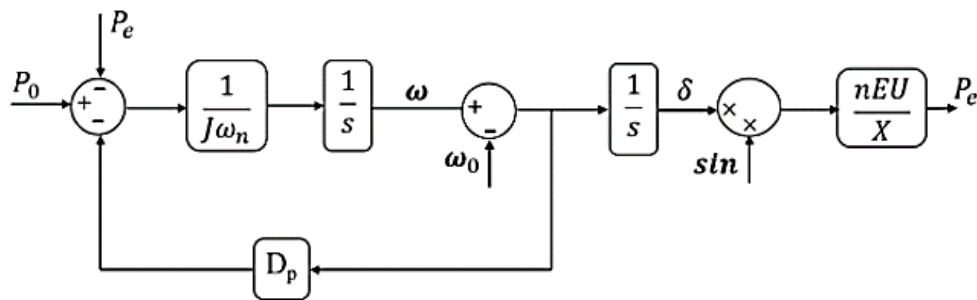
$$\delta = \int (\omega - \omega_0) dt \quad (3-3)$$

در اینجا، δ زاویه توان، ω_0 فرکانس نامی و ω فرکانس VSG است. رابطه بین P_e و امپدانس خط X ، E و U و δ نیز به صورت (۴-۳) بیان می‌شود:

$$P_e = \frac{nEU}{X} \sin \delta \quad n = (1, 3) \quad (4-3)$$

در اینجا، n بیانگر تعداد فاز است و P_e توان تولیدی VSG می‌باشد. از ترکیب معادلات (۲-۳)، (۳-۳) و

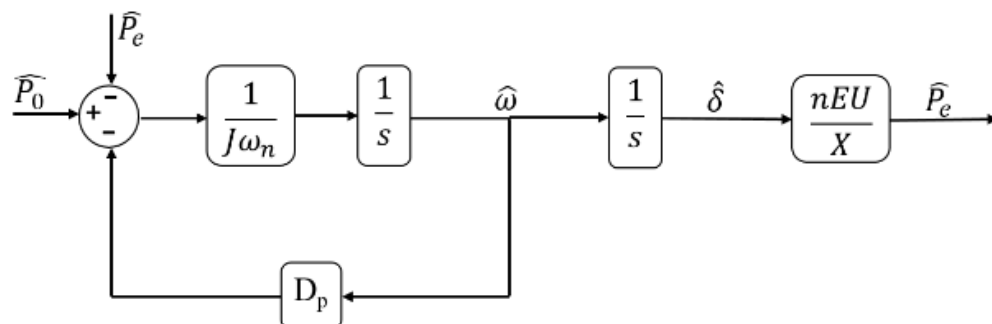
(۴-۳) حلقه کنترل توان اکتیو-فرکانس همانند شکل (۲-۳) به دست می آید. توجه داشته باشید که این یک مدل کلی از ژنراتور سنکرون مجازی است، یعنی اگر n برابر با ۱ باشد، نشان دهنده یک سیستم تک فاز است، در حالی که اگر n برابر با ۳ باشد، نشان دهنده یک سیستم سه فاز است [33].



شکل ۲-۳: حلقه کنترل توان اکتیو-فرکانس VSG

با گرفتن مدل سیگنال کوچک از حلقه کنترل توان اکتیو-فرکانس و نقاط عملیاتی حالت ماندگار داده شده در معادله (۵-۳) و با فرض اینکه هر متغیر حالت X برابر با حالت ماندگار آن یعنی X_n است و از آنجایی که $\hat{\delta}$ بسیار کوچک است، پس $\sin(\hat{\delta}) \approx \hat{\delta}$ می شود یعنی $\hat{\delta} \approx \sin(\hat{\delta})$. و فرض بر این است که ω_0 تقریباً یک مقدار ثابت است، پس $\hat{\omega} = 0$ است. بنابراین، حلقه کنترل توان اکتیو در شکل (۲-۳) با استفاده از مدل سازی سیگنال کوچک، همانطور که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است، خطی می شود.

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{0n} + P_0, \quad P_e = P_{en} + P_e, \quad \omega_0 = \omega_{0n} + \hat{\omega}_0, \\ \omega &= \omega_n + \hat{\omega} \\ \delta &= \delta_n + \hat{\delta} \end{aligned} \quad (۵-۳)$$



شکل ۳-۳: مدل خطی شده حلقه کنترل فرکانس-توان

۳-۴ تاثیر ضریب میرایی (D_p) و اینرسی (J) بر عملکرد دینامیکی VSG

در این بخش تاثیر دو پارمتر D_p و J بر مشخصات دینامیکی فرکانس و توان VSG از جمله اضافه جهش، زمان نشست و زمان پیک بررسی خواهد شد. یک VSG پایدار نیازمند یک اضافه جهش کوچک به همراه یک زمان نشست کوتاه است.

۳-۴-۱ تاثیر ضریب میرایی بر عملکرد دینامیکی توان و فرکانس VSG

در شکل (۳-۳) تابع انتقال از P_0 به P_e به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{\hat{P}_e}{\hat{P}_0} |_{\hat{\omega}_0=0} = \frac{EU}{J\omega_n X S^2 + D_p X S + EU} \quad (۳-۶)$$

تابع انتقال از P_0 به ω به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\hat{\omega}}{\hat{P}_0} |_{\hat{\omega}_0=0} = \frac{XS}{J\omega_n X S^2 + D_p X S + EU} \quad (۳-۷)$$

با توجه به معادله (۳-۶) قطبها را می توان به صورت معادله (۳-۸) محاسبه کرد:

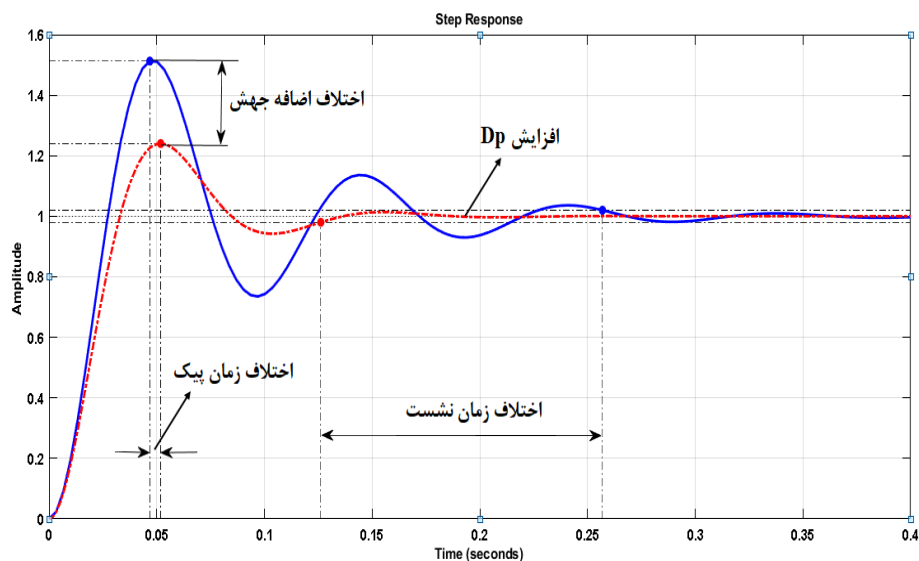
$$s_{1,2} = \frac{-D_p X \pm \sqrt{D_p^2 X^2 - 4J\omega_n X EU}}{2J\omega_n X} \quad (۳-۸)$$

در رابطه (۳-۸) می توان یافت که قطبها توسط D_p و J تحت تاثیر قرار می گیرند. اگر پارامترها به صورت نامناسبی انتخاب شوند، قطبها بسیار نزدیک به محور موهومی می شوند که موجب نوسان توان می شوند. بنابراین برای مشاهده اثرات D_p و J بر پاسخ دینامیکی توان و فرکانس خروجی در VSG مانند زمان پاسخ، اضافه جهش، زمان نشست و ... در این بخش تأثیرات پارامتر اختلال در ویژگی های دینامیکی توان و فرکانس خروجی در حوزه زمان تجزیه و تحلیل می شود.

باتوجه به رابطه (۶-۳) پاسخ پله توان با تغییر D_p می‌تواند به صورت شکل (۴-۳) نمایش داده شود. همان-طور که مشاهده می‌شود با افزایش D_p زمان پیک کمی افزایش یافته است در حالیکه اضافه جهش و زمان نشست به طور چشم‌گیری کاهش یافته‌اند. با کاهش D_p اضافه جهش بزرگ خواهد شد که باعث آسیب به سیستم می‌شود و همچنین زمان نشست طولانی می‌شود که ممکن است منجر به نوسان توان شود که این موضوع برای پایداری مناسب نیست. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۱-۳) آورده شده است.

جدول ۱-۳: پارامترهای سیستم

پارامتر	مقدار	واحد
ولتاژ باس DC (U_{dc})	۴۰۰	V
ولتاژ شبکه (U_{abc})	۳۱۱	V
فرکانس کلیدزنی (f_s)	۱۶۰۰۰	Hz
فرکانس شبکه (f)	۵۰	Hz
اندوکتانس سمت اینورتر (L_1)	۲/۴	mH
اندوکتانس سمت شبکه (L_2)	۲/۴	mH
خازن (C_f)	۴	μf
J بزرگ	۰/۰۹۲	Kg.m ²
J کوچک	۰/۰۲۳	Kg.m ²
D_p بزرگ	۱۵۹۲/۳۳	W.rad/s
D_p کوچک	۷۹۶/۱۶	W.rad/s



شکل ۳-۴: پاسخ پله توان با تغییر D_p

از طریق تبدیل لاپلاس معکوس رابطه (۳-۶) معادله (۳-۹) به دست می آید:

$$\hat{P}_e(t) = \hat{P}_0 \left[\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{D_p^2 X}{4J\omega_n EU}}} e^{-\frac{D_p}{2J\omega_n} \sin}}{\left(\sqrt{\frac{EU}{J\omega_n X}} \sqrt{1 - \frac{D_p^2 X}{4J\omega_n EU}} t + \arccos\left(\frac{D_p}{2} \sqrt{\frac{X}{J\omega_n EU}}\right) \right)} \right] \quad (۳-۹)$$

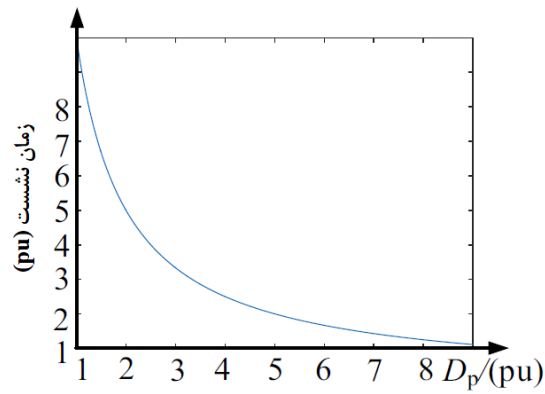
با توجه به رابطه (۳-۹) مقادیر پایه اضافه جهش، زمان نشست و زمان پیک توان می توانند به صورت زیر

نوشته شوند:

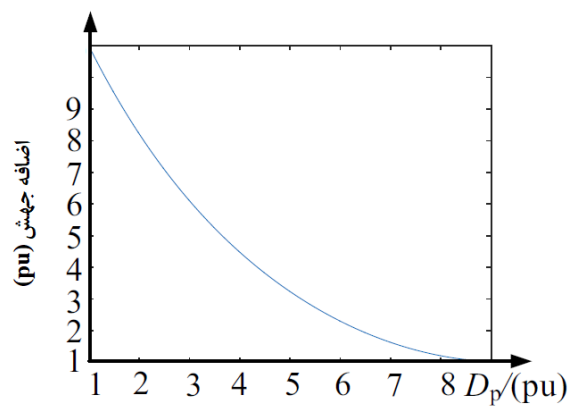
$$\begin{aligned} \text{زمان پیک توان} &= \frac{2\pi J\omega_n X}{\sqrt{4J\omega_n XEU - D_p^2 X^2}}, \\ \text{اضافه جهش توان} &= e^{-\pi \sqrt{\frac{XD_p^2}{4J\omega_n EU - D_p^2 X}}}, \\ \text{زمان نشست توان} &= \frac{8J\omega_n}{D_p}, \quad \text{نسبت میرایی} = \frac{D_p}{2} \sqrt{\frac{X}{J\omega_n EU}} \end{aligned} \quad (۱۰-۳)$$

باتوجه به معادله (۱۰-۳) شاخص‌های دینامیکی توان می‌توانند به صورت شکل (۵-۳) ترسیم شوند. در این شکل مقادیر به صورت pu درج شده‌اند. خط محور افقی نشان‌دهنده D_p و روند افزایش آن و خط عمودی نشان‌دهنده هر کدام از شاخص‌های دینامیکی توان می‌باشد. کاملاً مشخص است که وقتی D_p افزایش می‌یابد زمان نشست و اضافه جهش کاهش می‌یابند که به ترتیب در شکل (۵-۳) (الف) و شکل (۵-۳) (ب) نشان داده شده‌اند که دو عامل بسیار مهم در بررسی پایداری می‌باشند و همچنین زمان پیک مقداری کاهش می‌یابد که در شکل (۵-۳) (ج) نشان داده شده است.

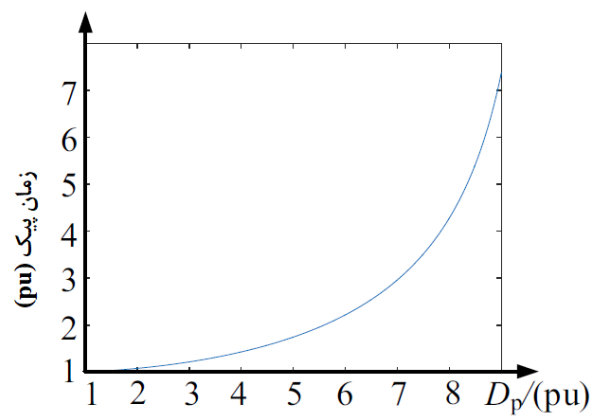
به طور مشابه، می‌توان پاسخ پله فرکانس را با ارجاع به رابطه (۷-۳) به صورت شکل (۶-۳) ترسیم کرد. باتوجه به شکل (۶-۳) می‌توان یافت که با افزایش D_p تمامی پارامترهای مهم دینامیکی پاسخ فرکانس از جمله اضافه جهش، زمان نشست و زمان پیک کاهش یافته‌اند. پس افزایش D_p می‌تواند برای پایداری فرکانس مفید باشد.



(الف)

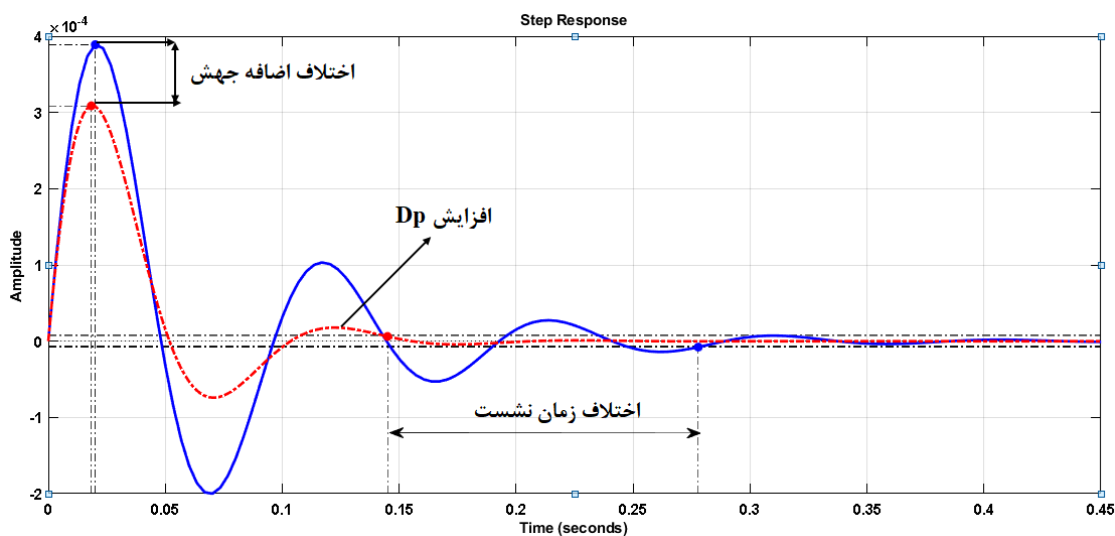


(ب)



(ج)

شکل ۳-۵: نمودارهای شاخص‌های دینامیکی توان با توجه به تغییر D_p . (الف) زمان نشست. (ب) اضافه جهش. (ج) زمان پیک



شکل ۳-۶: پاسخ پله فرکانس با تغییر D_p

تبدیل معکوس لاپلاس رابطه (۳-۷) به صورت زیر بیان می شود:

$$\hat{\omega}(t) = \hat{P}_0 \left[\frac{\sqrt{\frac{EU}{J\omega_n X}}}{\sqrt{1 - \frac{D_p^2 X}{4J\omega_n EU}}} e^{\frac{D_p}{2J\omega_n} t} \sin \left(\sqrt{\frac{EU}{J\omega_n X}} \sqrt{1 - \frac{D_p^2 X}{4J\omega_n EU}} t \right) \right] \quad (۳-۱۱)$$

با توجه به معادله (۳-۱۱) مقادیر پایه اضافه جهش، زمان نشست و زمان پیک فرکانس می توانند به صورت

معادله (۳-۱۲) نوشته شوند:

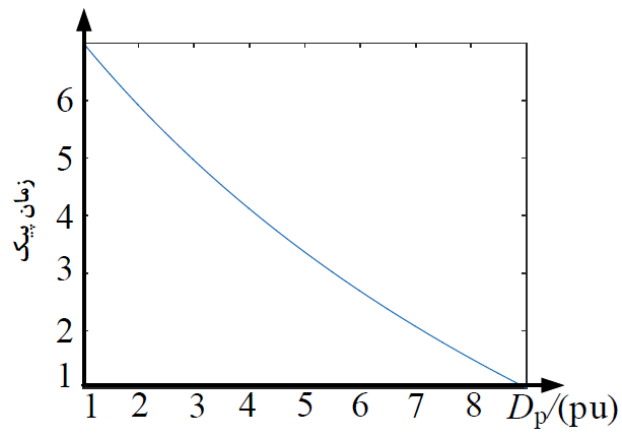
$$\text{زمان پیک فرکانس} = \frac{\arctan \sqrt{\frac{4J\omega_n XEU - D_p^2 X}{D_p^2 X}}}{\sqrt{\frac{EU}{J\omega_n X} - \frac{D_p^2}{4J^2 \omega_n^2}}},$$

$$\text{زمان نشست فرکانس} = \frac{8J\omega_n}{D_p} \quad (12-3)$$

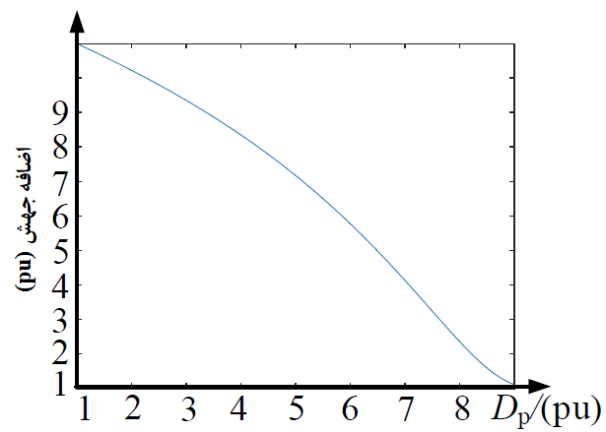
$$\text{اضافه جهش فرکانس} = \sqrt{\frac{4EU}{J\omega_n X}} e^{-\sqrt{\frac{D_p^2 X}{4J\omega_n XEU - D_p^2 X}} \arctan \sqrt{\frac{4J\omega_n XEU - D_p^2 X}{D_p^2 X}}}$$

مطابق با رابطه (۱۲-۳) می‌توان شاخص‌های دینامیکی فرکانس را از جمله زمان نشست، اضافه جهش و زمان پیک همانند شکل (۷-۳) ترسیم کرد. باتوجه به شکل (۷-۳)، مشاهده می‌شود که تمامی شاخص‌ها با افزایش D_p کاهش یافته‌اند همانگونه که در شکل (۶-۳) نیز به وضوح دیده می‌شود.

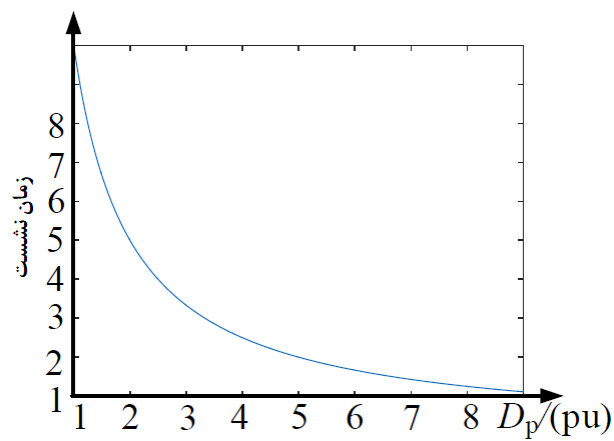
علاوه بر D_p ، پارامتر دیگری که بر توان خروجی و فرکانس تاثیر می‌گذارد، اینرسی J است. بنابراین در بخش بعد، تاثیر J بر روی ویژگی‌های خروجی VSG به طور دقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.



(الف)



(ب)



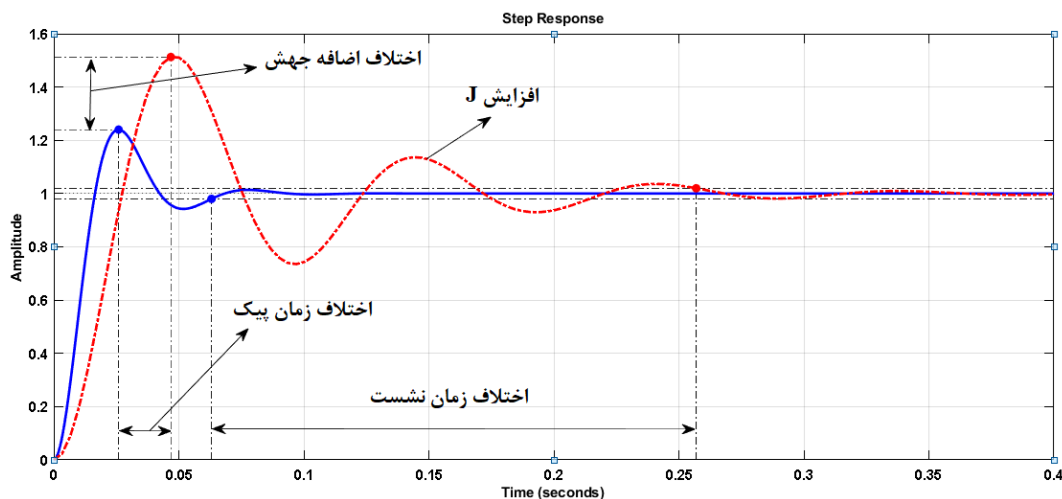
(ج)

شکل ۷-۳: نمودارهای شاخص‌های دینامیکی فرکانس با توجه به تغییر D_p . (الف) زمان پیک. (ب) اضافه جهش. (ج) زمان نشست

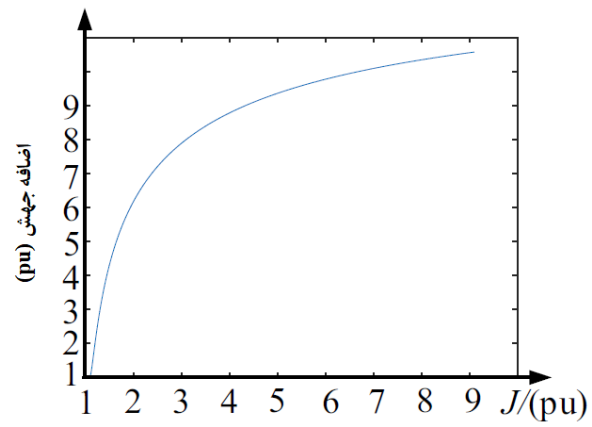
۳-۴-۲ تأثیرات اینرسی (J) بر عملکرد دینامیکی توان اکتیو و فرکانس VSG

با توجه به معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۲) دیده می‌شود که تمامی شاخص‌های دینامیکی توان و فرکانس تحت تاثیر J قرار دارند. شکل (۳-۸) و شکل (۳-۹) به ترتیب پاسخ پله توان و شاخص‌های دینامیکی توان را با توجه به تغییر J نشان می‌دهند. بدیهی است، هنگامی که J افزایش می‌یابد، تمامی شاخص‌های دینامیکی توان افزایش می‌یابند و اگر J بیشتر افزایش یابد ممکن است باعث ایجاد نوسان در توان شود که می‌تواند ناپایداری را به همراه داشته باشد. با این حال، همانطور که در شکل (۳-۹) (ب) نیز مشخص است در زمان پیک یک نقطه انحناء وجود دارد که یک تابع غیر یکنواخت می‌باشد. موقعیت نقطه انحناء وابسته به D_p و J می‌باشد. عبارت مخصوص نقطه انحناء می‌تواند به صورت رابطه (۳-۱۳) توصیف شود.

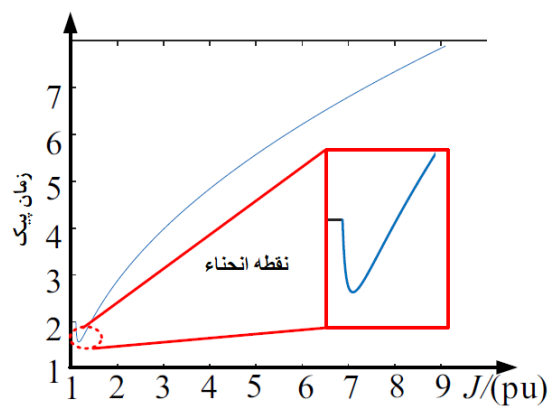
$$J_{tp} = \frac{D_p^2}{2\omega_n EU} \quad (۳-۱۳)$$



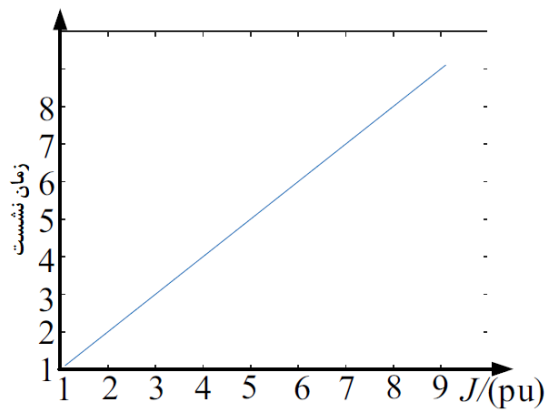
شکل ۳-۸: پاسخ پله توان با تغییر J



(الف)



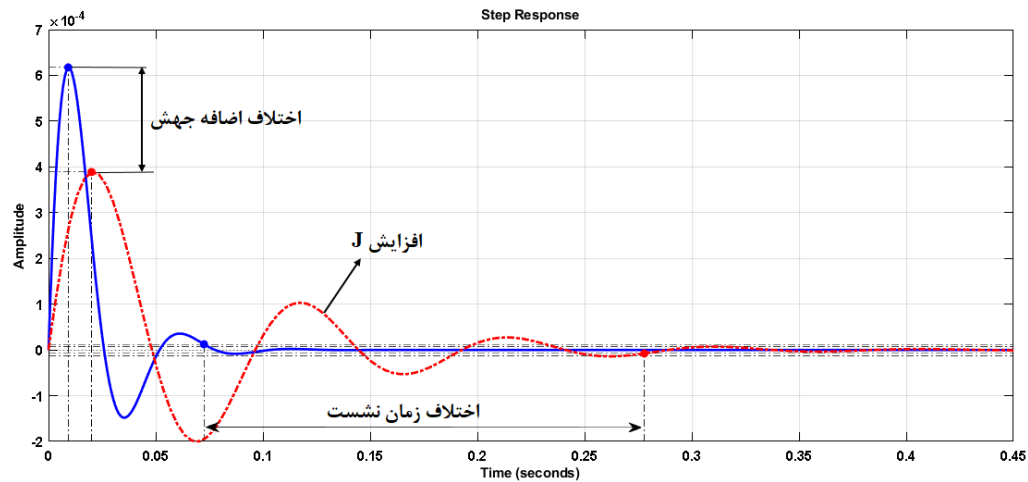
(ب)



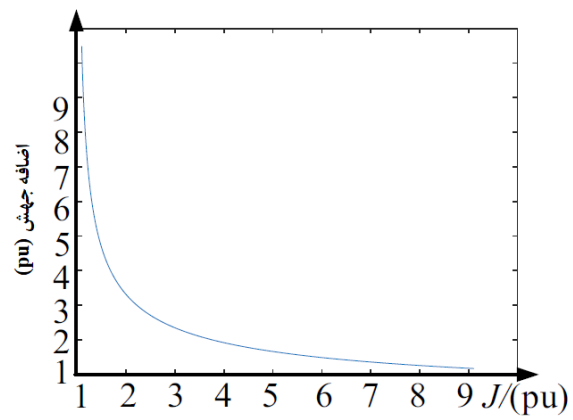
(ج)

شکل ۳-۹: نمودارهای شاخص‌های دینامیکی توان با تغییر J . (الف) اضافه جهش. (ب) زمان پیک. (ج) زمان نشست

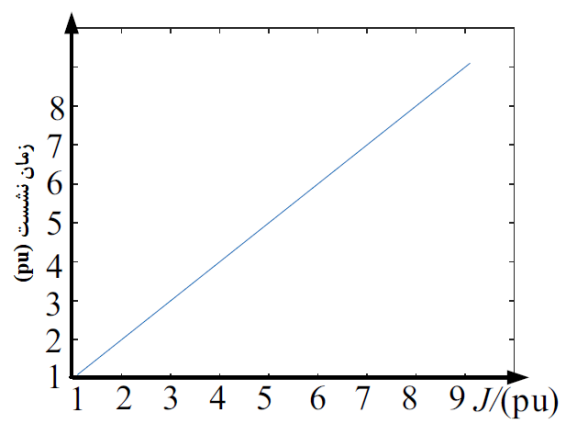
پاسخ پله فرکانس و شاخص‌های دینامیکی آن به ترتیب در شکل‌های (۳-۱۰) و (۳-۱۱) ترسیم شده‌اند. با توجه به این دو شکل، مشخص است که با افزایش J زمان پیک و زمان نشست افزایش یافته‌اند اما اضافه جهش با کاهش رو به رو می‌باشد. می‌توان گفت، افزایش J برای زمان‌های نشست و پیک فرکانس مناسب نیست اما برای مهار اضافه جهش آن مناسب است.



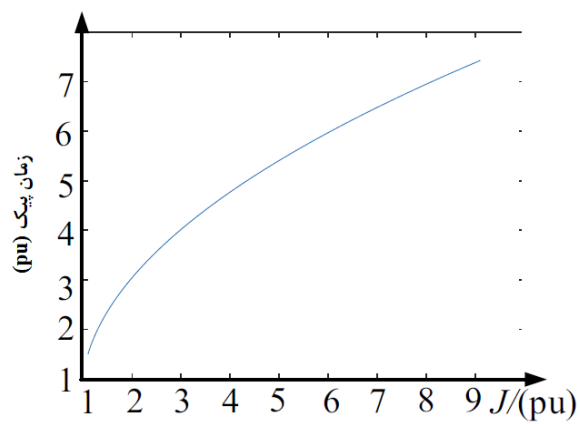
شکل ۳-۱۰: پاسخ پله فرکانس با تغییر J



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۱۱: نمودارهای شاخص‌های دینامیکی فرکانس با تغییر J . (الف) اضافه جهش. (ب) زمان نشست. (ج) زمان پیک.

بر اساس تجزیه و تحلیل‌های فوق، عملکردهای دینامیکی توان و فرکانس با تغییرات J و D_p در جدول (۳-۲) خلاصه شده است.

جدول ۳-۲: تاثیر D_p و J بر عملکردهای دینامیکی توان و فرکانس

$D_p \uparrow$	$J \uparrow$	
↓	↑	اضافه جهش
↓	↑	زمان نشست
↑	↑	زمان پیک
↓	↓	اضافه جهش
↓	↑	زمان نشست
↓	↑	زمان پیک

توان

فرکانس

۵-۳ جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا بر روی نحوه مدلسازی یک VSG بحث شد و در ادامه به بررسی تاثیر دو پارامتر مهم یعنی D_p و J بر روی پاسخ دینامیکی توان و فرکانس VSG پرداخته شد. دیده شد که افزایش D_p به‌طور کلی بر روی هر دو پاسخ دینامیکی توان و فرکانس عملکرد خوبی دارد که با کاهش بیش از حد آن موجب به راه افتادن نوسان در توان می‌شود که ممکن است ناپایداری را به همراه داشته باشد. از آن طرف افزایش J به‌طور کلی باعث تخریب عملکرد دینامیکی توان شد و همچنین افزایش آن برای زمان‌های نشست و پیک فرکانس مناسب نیست اما می‌تواند برای مهار اضافه جهش فرکانس مفید باشد. در فصل بعد یک استراتژی کنترلی برای VSG‌های تکفاز، سه‌فاز و موازی ارائه می‌شود و در برابر اغتشاشات مورد آزمایش قرار خواهد گرفت و عملکرد VSG در مقابل حضور انحراف DC بررسی و روشی برای حذف این مؤلفه ارائه خواهد شد. همچنین برای مهار بهتر نوسانات یک طرح فازی جدید نیز ارائه خواهد شد.

فصل ۴ : روش های پیشنهادی برای بهبود عملکرد VSG

۴-۱ مقدمه

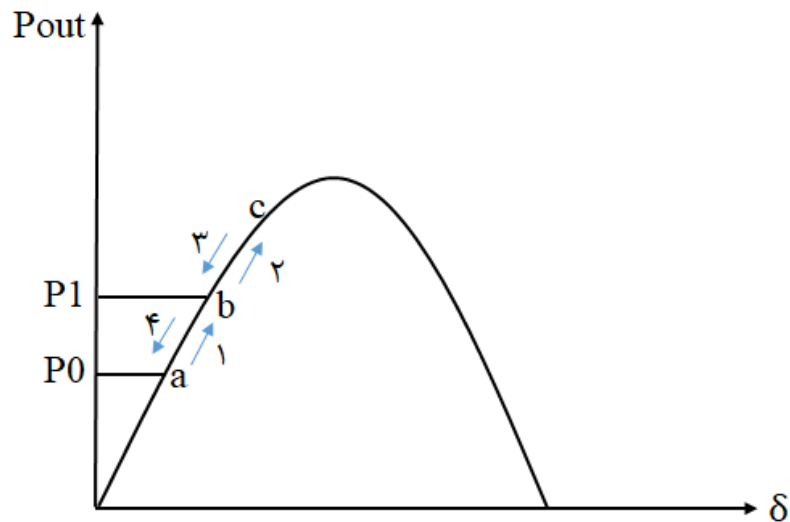
در این فصل ایده اینرسی انعطاف پذیر مطرح خواهد گردید و توسط دو طرح کنترل متناوبی و کنترل فازی بر روی سیستم VSG مورد مطالعه پیاده سازی خواهد شد. این دو طرح تحت دو سناریو تغییر توان تولیدی و تغییر بار قرار خواهند گرفت. هدف اصلی در این فصل بهبود عملکرد دینامیکی سیستم VSG است. برای بهبود کارایی VSG مورد مطالعه در شرایط وجود هارمونیک‌های اضافی و انحراف DC یک TOGI معرفی خواهد شد که توسط آن پایداری سیستم VSG در اینگونه شرایط کاری حفظ خواهد شد.

۴-۲ اینرسی انعطاف پذیر

اینرسی انعطاف پذیر، اینرسی است که در هنگام اغتشاش با تغییر صحیح و به موقع مقدار آن بتوان نوسانات را حذف کرد. شکل (۱-۴) منحنی تغییرات توان/زاویه را نشان می‌دهد. در معادله (۱-۲) که معادله نوسان می‌باشد $d\omega_m/dt$ به همراه $\Delta\omega$ تعریف شتاب یا کاهش شتاب را در فرکانس می‌دهند. همانطور که در شکل (۱-۴) مشخص است یک دوره (سیکل) نوسان شامل چهار بخش است. برای مثال، در بخش ۳، $d\omega_m/dt$ و $\Delta\omega$ هر دو منفی هستند و در یک جهت عمل می‌کنند بنابراین این یک دوره شتاب است و زمانی که مخالف علامت هستند مانند بخش ۴ یک دوره کاهش شتاب می‌باشد.

هدف میرا کردن نوسانات توان و فرکانس توسط کنترل دوره‌های شتاب و کاهش شتاب می‌باشد. $d\omega_m/dt$ میزان شتاب یا کاهش شتاب را نشان می‌دهد. با توجه به معادله نوسان، مشاهده می‌شود که این نرخ رابطه معکوس با اینرسی دارد. بر این اساس، می‌توان یک J بزرگ را در بخش‌های شتاب (a به b و c به b) و یک J کوچک را در بخش‌های کاهش شتاب (b به c و a به b) انتخاب کرد. این عملیات برای هر دوره نوسان تکرار می‌شود تا گذراها به کلی مهار شوند و تعادل برقرار شود. اجرای این استراتژی را کنترل متناوبی J می‌نامیم که در جدول (۱-۴) خلاصه شده است. J بزرگ و J کوچک می‌توانند متناسب

با توان مجاز در یک رنج وسیعی انتخاب شوند به طوری که اختلاف بین J بزرگ و J کوچک توان میرا شده در هر نیم سیکل نوسان را تعیین می کنند. با این حال، استفاده از یک مقدار بسیار بزرگتر J منجر به گردش فرکانس کوچکتر در سیکل اول با پاسخی کند خواهد شد. مقدار J کوچک گذرای سیکل دوم نوسانات را تعیین می کند.



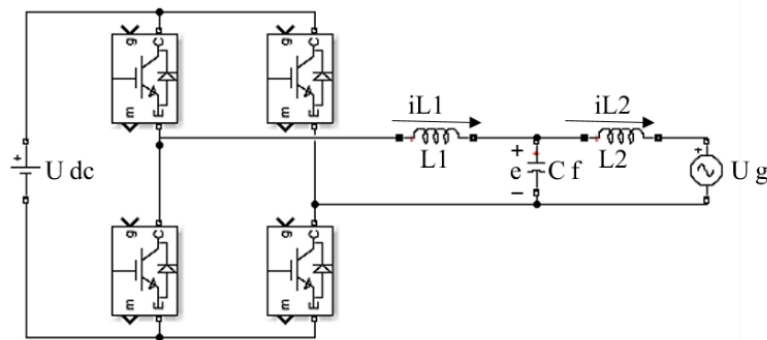
شکل ۱-۴: تغییرات زاویه/توان [19]

جدول ۱-۴: قوانین J

بخش	$\Delta\omega$	$d\omega_m/dt$	J
۱	$\Delta\omega > 0$	$d\omega_m/dt > 0$	J بزرگ
۲	$\Delta\omega < 0$	$d\omega_m/dt > 0$	J کوچک
۳	$\Delta\omega < 0$	$d\omega_m/dt < 0$	J بزرگ
۴	$\Delta\omega > 0$	$d\omega_m/dt < 0$	J کوچک

۱-۲-۴ اجرای کنترل متناوبی J

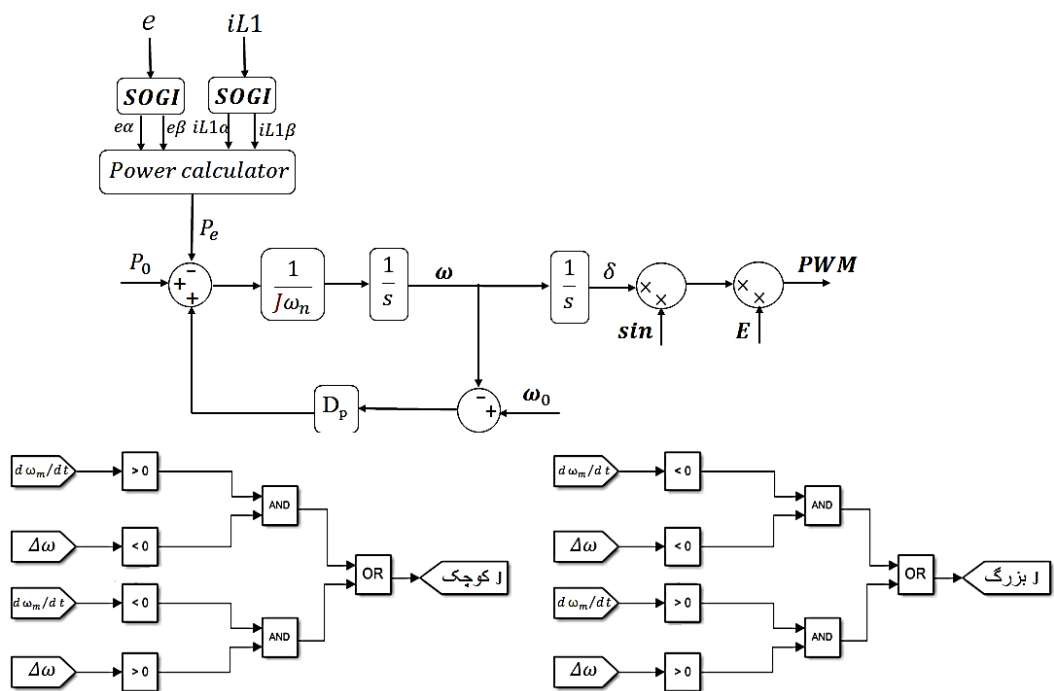
شکل (۲-۴) مدار قدرت یک VSG تک فاز را نشان می‌دهد. C_f ، L_1 و L_2 به ترتیب نشان‌دهنده خازن فیلتر، اندوکتانس فیلتر در سمت اینورتر و اندوکتانس فیلتر در سمت ولتاژ باس DC هستند. U_{dc} و i_{L1} و e نیز به ترتیب ولتاژ و جریان ترمینال خروجی VSG هستند.



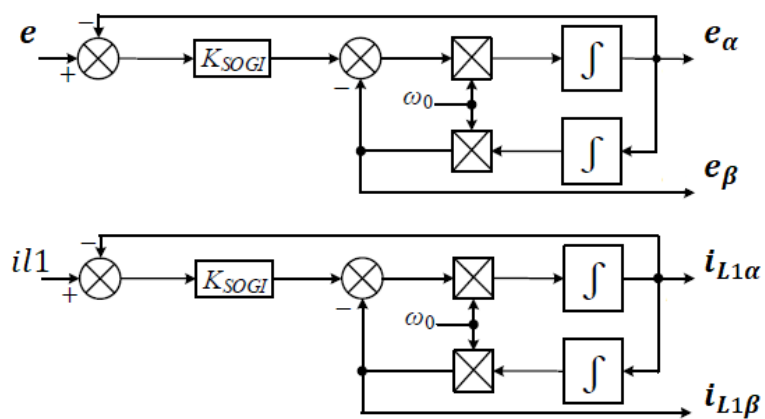
شکل ۲-۴: مدار قدرتی یک VSG تک فاز

طرح کنترل متناوبی J در شکل (۳-۴) آورده شده است. انتگرال گیر تعمیم یافته مرتبه دوم^۱ (SOGI) که در شکل (۴-۴) نشان داده شده است برای انجام همگام‌سازی اینورترهای متصل به شبکه استفاده می‌شود و قادر به استخراج مولفه‌های اصلی ولتاژ شبکه با دو خروجی سینوسی متعامد است. در این قسمت از SOGI برای تولید محورهای $\alpha\beta$ و همچنین محاسبه توان VSG استفاده شده است [37]. i_{L1} و e به ترتیب جریان و ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده اینورتر هستند که برای محاسبه توان VSG به واحد محاسبه توان هدایت می‌شوند. سیگنال توان VSG بدست آمده به حلقه کنترل VSG انتقال پیدا می‌کند و سپس حلقه کنترل VSG سیگنال زاویه توان را تولید می‌کند که به همراه سیگنال E به واحد PWM هدایت می‌شوند تا کلیدزنی اینورتر براساس سیگنال‌های صادر شده از VSG انجام شود. شکل (۳-۴) پایین کلیدهای دستوری می‌باشند که بر اساس جدول (۱-۴) مقادیر J کوچک و J بزرگ را تعیین می‌کنند.

^۱ Second-Order Generalized Integrator



شکل ۴-۳: توپولوژی کنترل متناوبی J



شکل ۴-۴: SOGI برای محاسبه توان VSG [33]

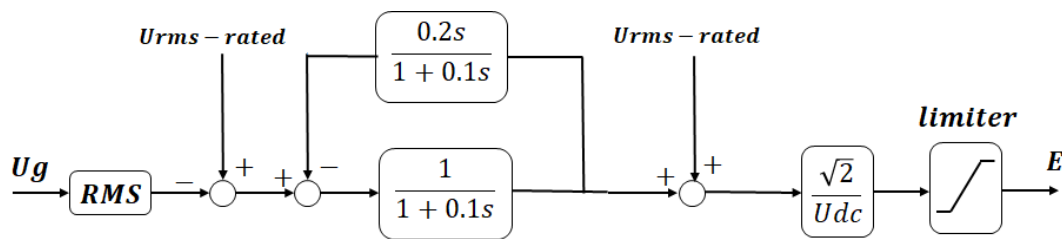
توان‌های اکتیو و راکتیو VSG توسط سیگنال‌های بدست آمده از SOGI به صورت معادله (۴-۱) محاسبه

می‌شوند:

$$P_e = \frac{(e_\alpha \times i_{L1\alpha} + e_\beta \times i_{L1\beta})}{2}$$

$$Q_e = \frac{(e_\alpha \times i_{L1\beta} + e_\beta \times i_{L1\alpha})}{2} \quad (1-4)$$

سیگنال E (ولتاژ ترمینال VSG) را می‌توان از مدل تنظیم‌کننده ولتاژ اتوماتیک (AVR) نشان داده شده در شکل (۵-۴) بدست آورد.



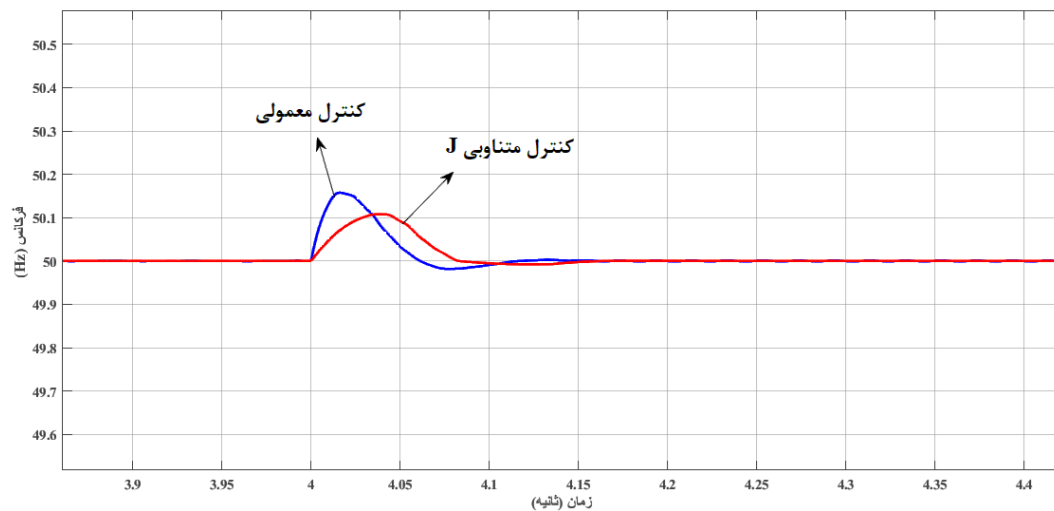
شکل ۵-۴: مدار تنظیم‌کننده ولتاژ اتوماتیک (AVR) [35]

شبیه‌سازی در دو سناریوی مختلف انجام شده است، یکی برای تغییر توان مرجع و دیگری برای تغییر بار، و سپس دو استراتژی کنترلی مختلف، کنترل معمولی با J ثابت (J کوچک)، کنترل متناوبی J انجام شده و باهم مقایسه شده‌اند.

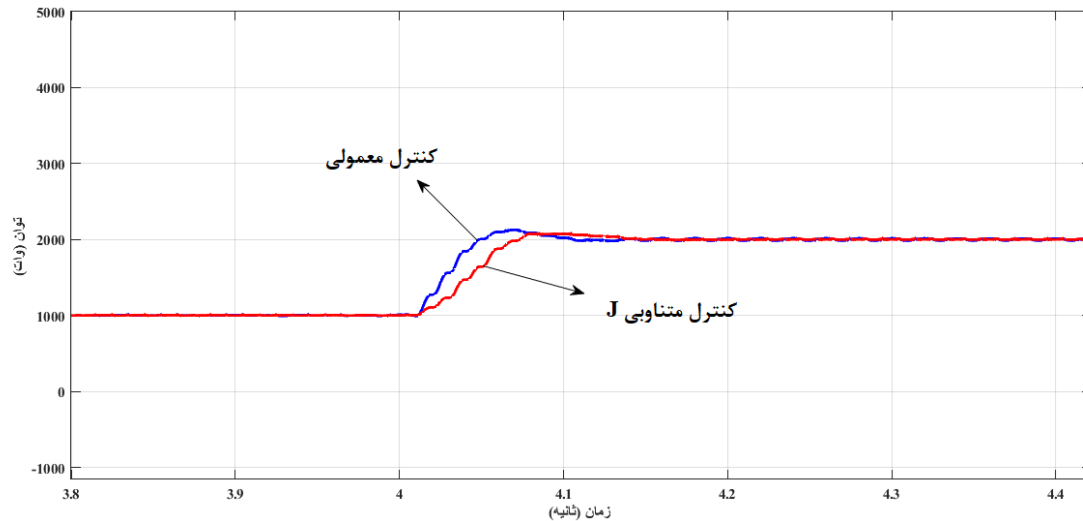
۱-۲-۴ سناریو اول: تغییر توان تولیدی

عدم تعادل در شبکه ناشی از عدم تعادل تولید و مصرف می‌باشد که منجر به انحراف فرکانس می‌شود. تغییر توان مرجع (تولیدی) در VSG باعث انحراف فرکانس می‌شود بنابراین، در این بخش، VSG با هر دو استراتژی کنترلی (کنترل متناوبی J و کنترل معمولی) برای حالتی که توان مرجع تغییر می‌کند بررسی شده و نتایج شبیه‌سازی هر دو کنترل‌کننده باهم مقایسه شده‌اند. ابتدا در زمان $t=4s$ به دلیل تغییرات آب و هوایی مانند تغییر شدت نور یا سایه، توان ورودی (توان مرجع) از ۱۰۰۰ وات به ۲۰۰۰ وات افزایش می‌یابد.

نمودار فرکانس سیستم و توان VSG برای هر دو استراتژی کنترلی به ترتیب در شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) نشان داده شده است. باتوجه به این دو شکل، دیده می‌شود که کنترل متناوبی J عملکرد بهتری را نسبت به کنترل معمولی دارد و فرکانس و توان هر دو از دینامیک بهتری برخوردار هستند.



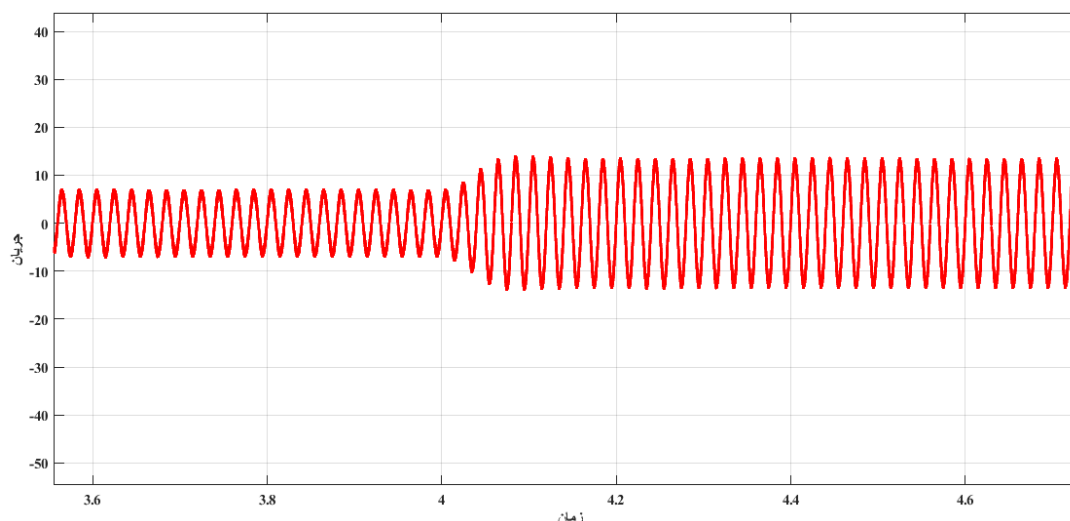
شکل ۴-۶: فرکانس سیستم با هر دو استراتژی کنترلی



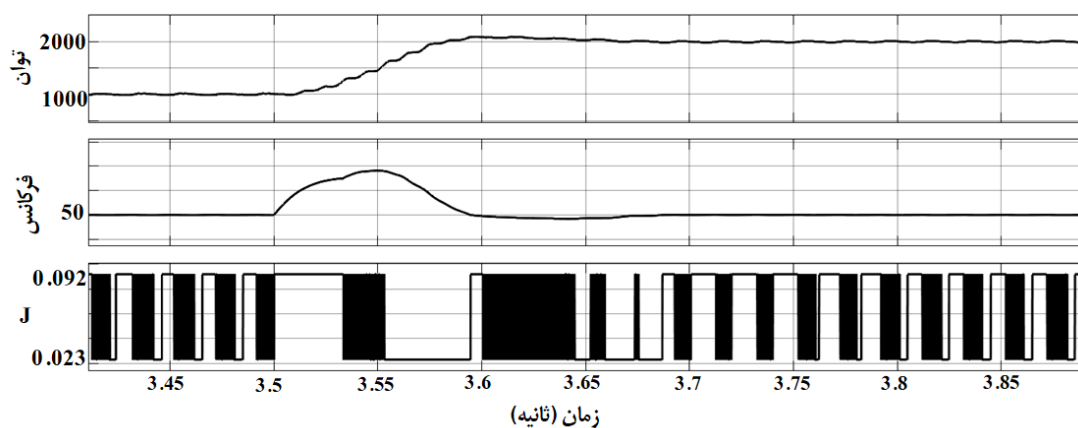
شکل ۴-۷: توان خروجی VSG با هر دو استراتژی کنترلی

شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) به ترتیب شکل موج جریان VSG با کنترل متناوبی J و روند تغییرات J را در هنگام اغتشاش نشان می‌دهند. باتوجه به شکل (۴-۹)، همانطور که دیده می‌شود در ابتدای وقوع اغتشاش

J بزرگ بکار گرفته شده است تا یک اینرسی بزرگ فراهم شود و از شتاب نوسان کاسته شود و در ادامه J کوچک اتخاذ شده است تا نوسانات سریع‌تر حذف شوند و این روند تا رسیدن به حالت پایدار ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۴-۸: جریان VSG

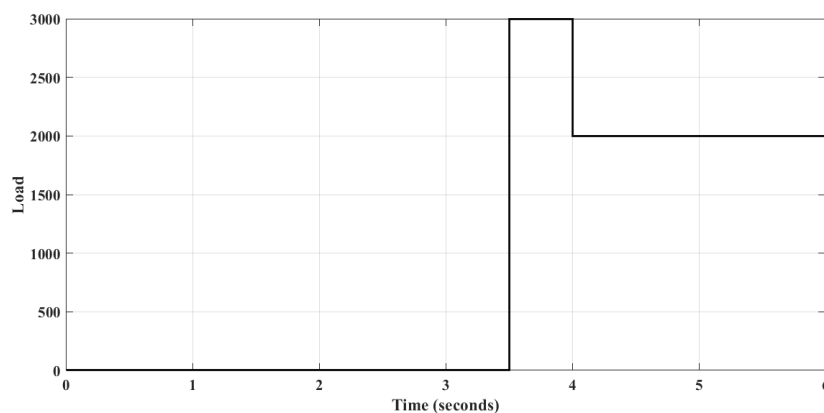


شکل ۴-۹: روند تغییرات J

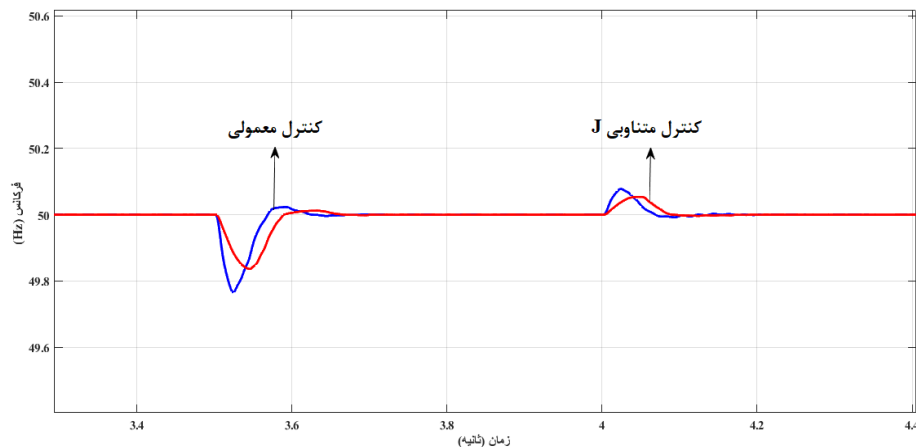
۲-۴ سناریو دوم: تغییر توان بار

یکی دیگر از عوامل ناتعادلی و انحراف فرکانس در شبکه تغییرات ناگهانی بار است. بنابراین در این قسمت،

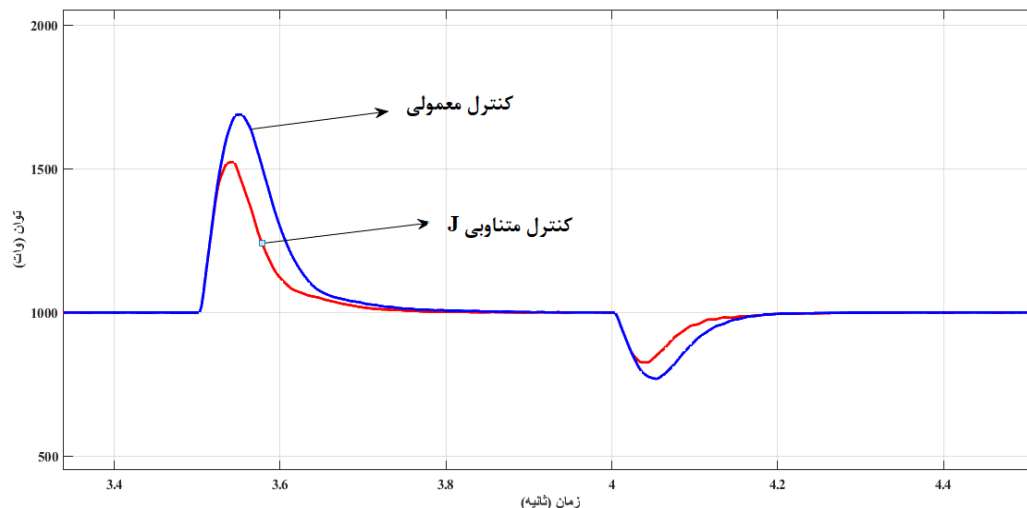
VSG با هر دو استراتژی کنترل کننده برای سناریو تغییر بار مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج باهم مقایسه شده‌اند. ابتدا در زمان $t=3.5s$ یک بار ۳۰۰۰ وات وارد سیستم شده است و در زمان $t=4s$ ۱۰۰۰ وات از سیستم خارج می‌شود. شکل (۴-۱۰) تغییر بار را نشان می‌دهد. شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) به ترتیب شکل موج فرکانس سیستم و توان خروجی VSG را برای هر دو استراتژی کنترلی نشان می‌دهند. باتوجه به شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲)، واضح است که کنترل متناوبی J در سناریوی دوم نیز از کنترل کننده معمولی عملکرد بهتری دارد.



شکل ۴-۱۰: تغییر بار



شکل ۴-۱۱: فرکانس سیستم با هر دو استراتژی کنترل کننده



شکل ۱۲-۴: شکل موج توان خروجی VSG با هر دو استراتژی کنترلی

۴-۲-۲ کنترل متناوبی J و D_p

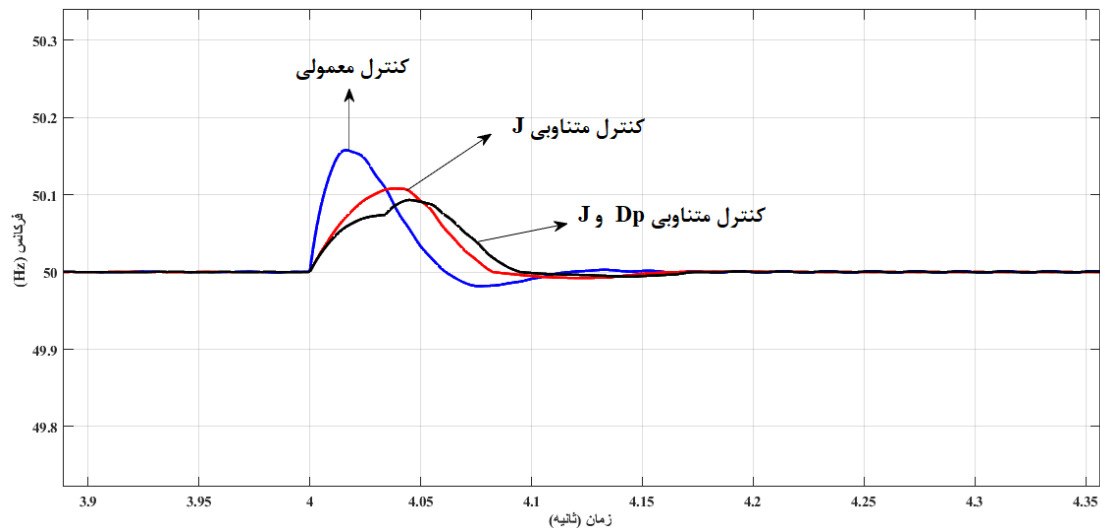
باتوجه به جدول (۲-۳)، ملاحظه می‌شود که D_p نیز مانند J بر پاسخ دینامیکی توان و فرکانس تأثیر می‌گذارد. یعنی می‌توانیم با تأثیر دادن همزمان J و D_p پاسخ دینامیکی را باز هم بهبود ببخشیم. اجرای این طرح را کنترل متناوبی J و D_p می‌نامیم که در جدول (۲-۴) خلاصه شده است.

جدول ۲-۴: قوانین J و D_p

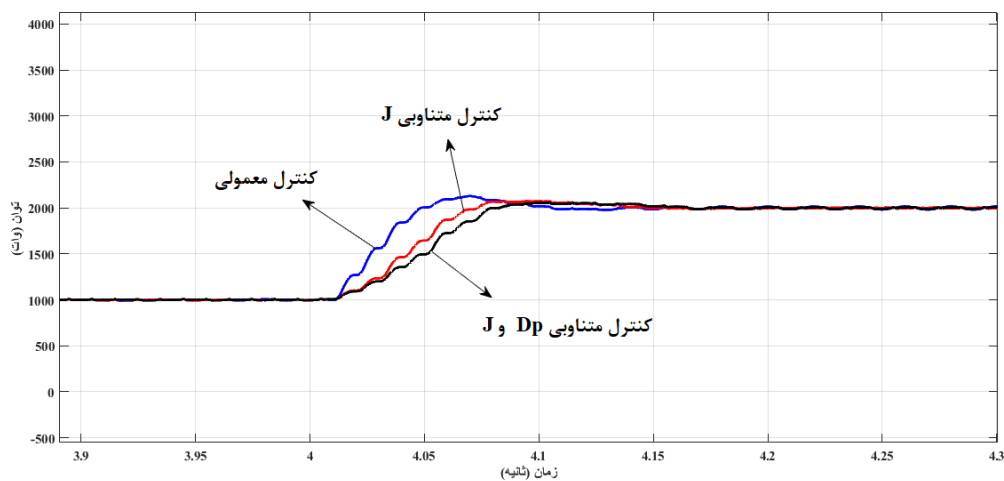
بخش	$\Delta\omega$	$d\omega_m/dt$	J	D_p
۱	$\Delta\omega > 0$	$d\omega_m/dt > 0$	J بزرگ	D_p بزرگ
۲	$\Delta\omega < 0$	$d\omega_m/dt > 0$	J کوچک	D_p کوچک
۳	$\Delta\omega < 0$	$d\omega_m/dt < 0$	J بزرگ	D_p بزرگ
۴	$\Delta\omega > 0$	$d\omega_m/dt < 0$	J کوچک	D_p کوچک

در این قسمت، کنترل متناوبی J و D_p در هر دو سناریو قبلی مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و عملکرد آن با

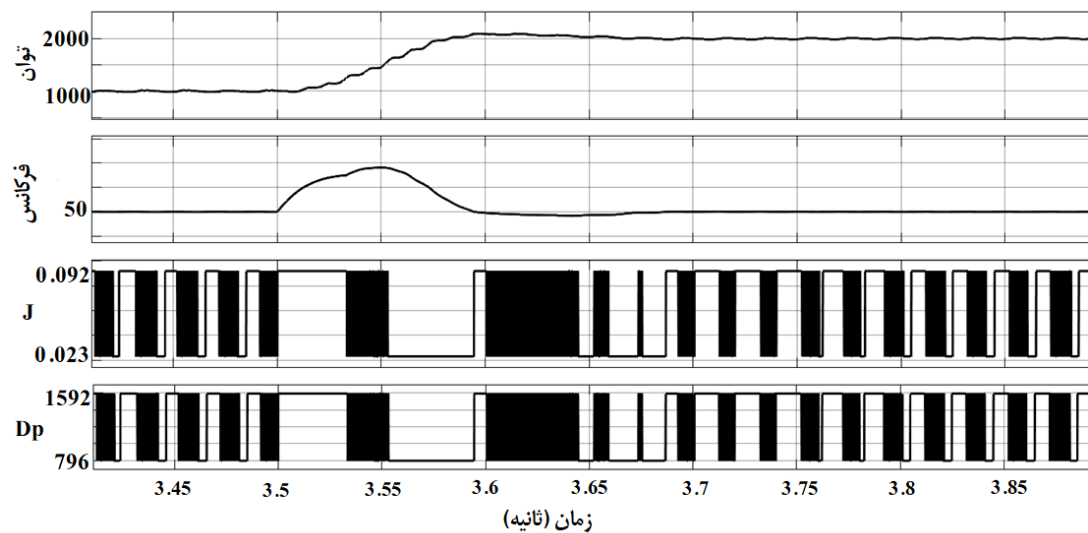
کنترل‌های دیگر مقایسه شده است. شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) به ترتیب فرکانس سیستم و توان خروجی VSG را در سناریو اول (تغییر توان تولیدی) و برای هر سه استراتژی کنترلی نشان می‌دهند. واضح است که استراتژی کنترل متناوبی J و D_p از سایر کنترل‌کننده‌ها عملکرد بهتری دارد. شکل (۴-۱۵) نیز روند تغییرات J و D_p نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۳: فرکانس سیستم با هر سه استراتژی کنترلی

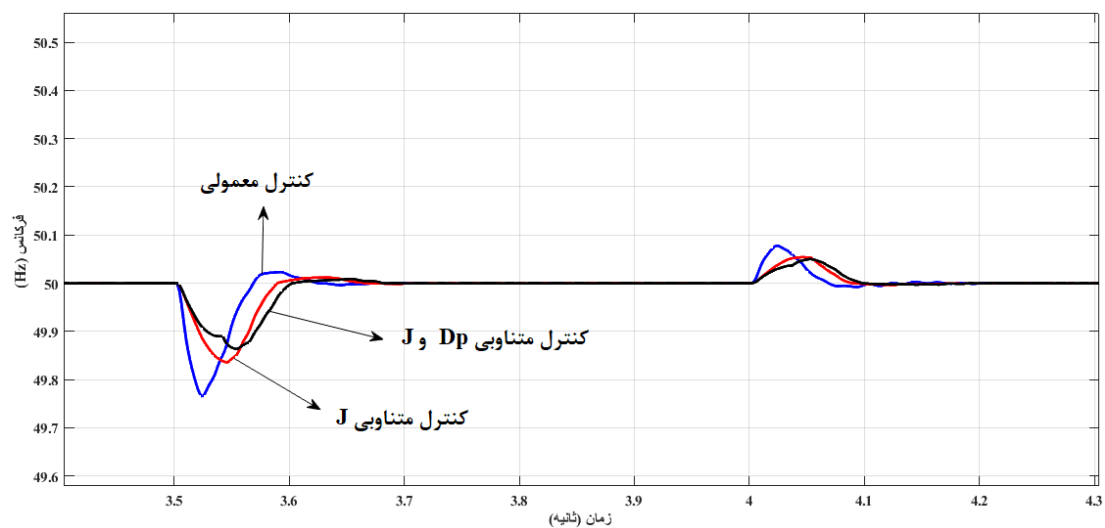


شکل ۴-۱۴: توان خروجی VSG با هر سه استراتژی کنترلی

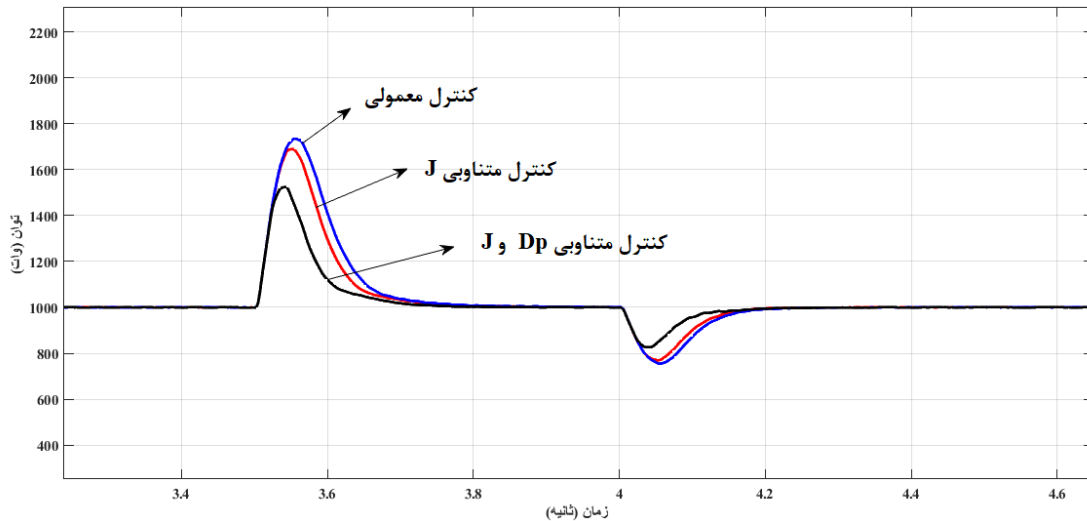


شکل ۴-۱۵: روند تغییرات J و D_p

شکل‌های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) به ترتیب فرکانس سیستم و توان خروجی VSG را در حالت سناریو دوم (تغییر بار) و برای هر سه استراتژی کنترلی نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود در حالت سناریو دوم نیز عملکرد کنترل متناوبی J و D_p از سایر کنترل‌کننده‌ها بهتر است.



شکل ۴-۱۶: فرکانس سیستم با هر سه استراتژی کنترلی

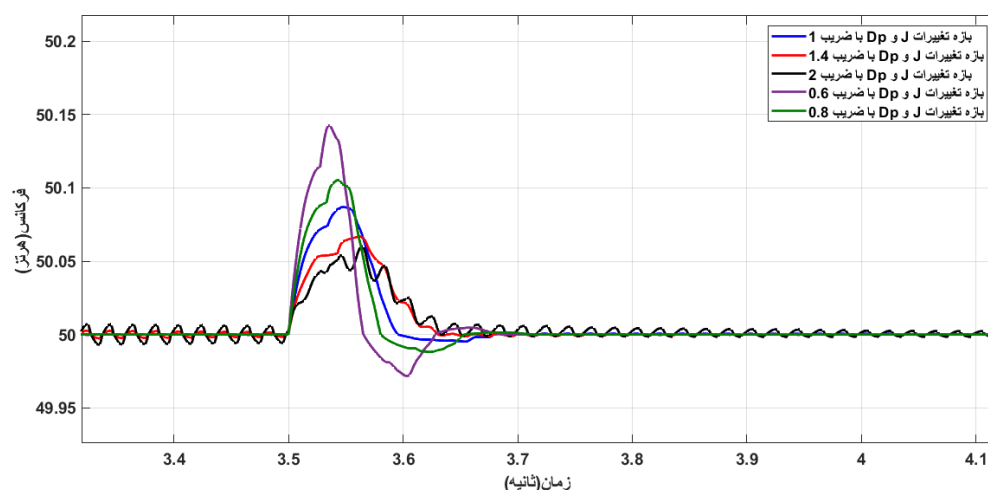


شکل ۴-۱۷: توان خروجی VSG با هر سه استراتژی کنترلی

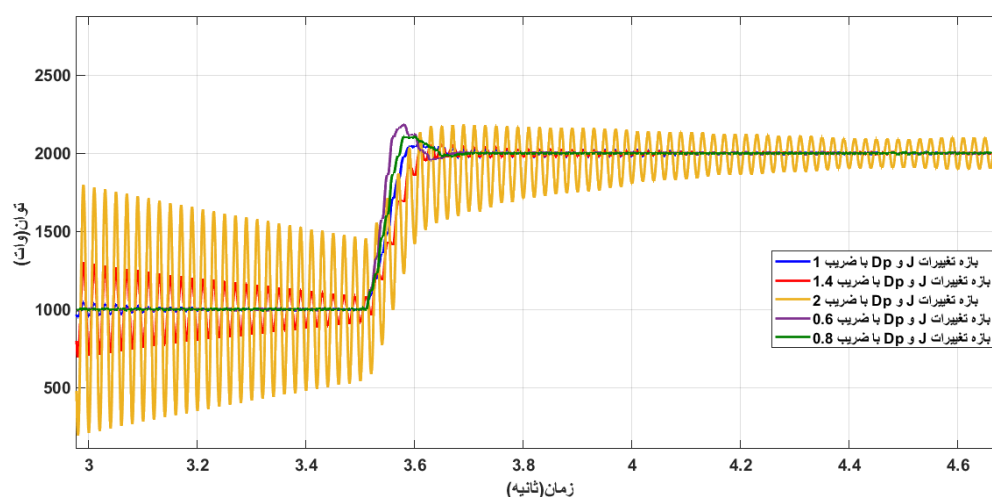
در ادامه به بررسی اثربخشی و تحقق عملکرد کنترل متناوبی بر روی سایر سیستم‌های VSG از جمله سه‌فاز و Multi-VSG پرداخته خواهد شد.

۳-۲-۴ اجرای کنترل متناوبی با مقادیر مختلف J و D_p

در این بخش طرح کنترل متناوبی J و D_p با مقادیر مختلف برای VSG مورد مطالعه شبیه‌سازی خواهد شد و نتایج شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه خواهند شد. بازه تغییرات مقادیر J و D_p در جدول (۳-۱) آورده شده است و در این بخش این مقادیر با ضرایب 0.6، 0.8، 1، 1.4 و 2 شبیه‌سازی خواهند شد (برای مثال، ضریب 2 یعنی مقادیر J و D_p دو برابر خواهند شد). شبیه‌سازی تحت همان سناریو ۱ انجام می‌شود. شکل‌های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) به ترتیب فرکانس سیستم و توان خروجی VSG را به ازای مقادیر فوق‌الذکر J و D_p نشان می‌دهند.

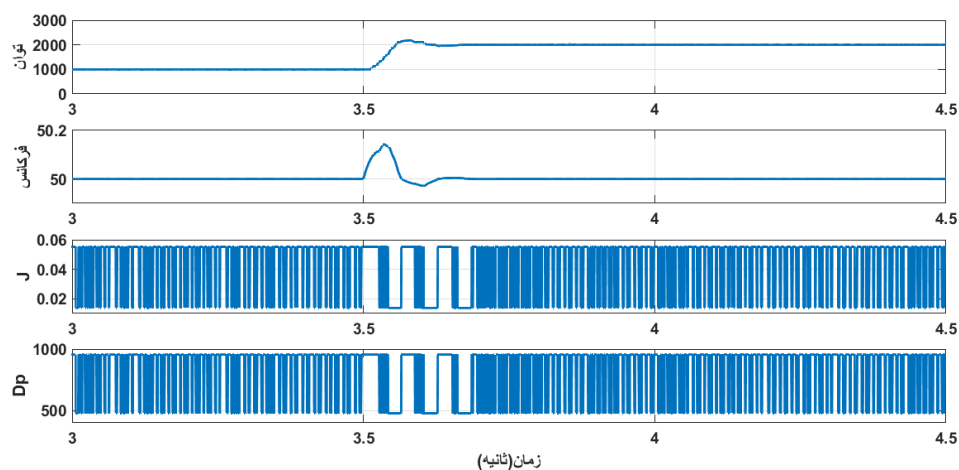


شکل ۴-۱۸: فرکانس سیستم با مقادیر مختلف بازه تغییرات J و D_p

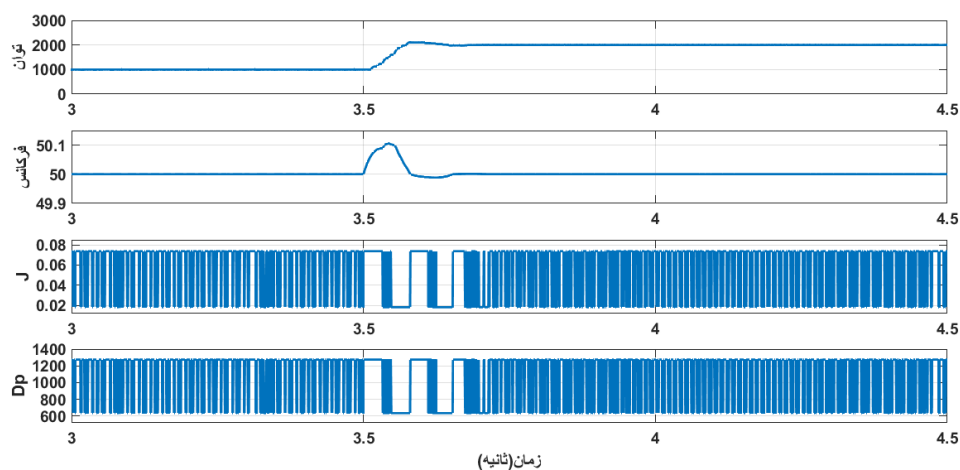


شکل ۴-۱۹: توان خروجی VSG با مقادیر مختلف بازه تغییرات J و D_p

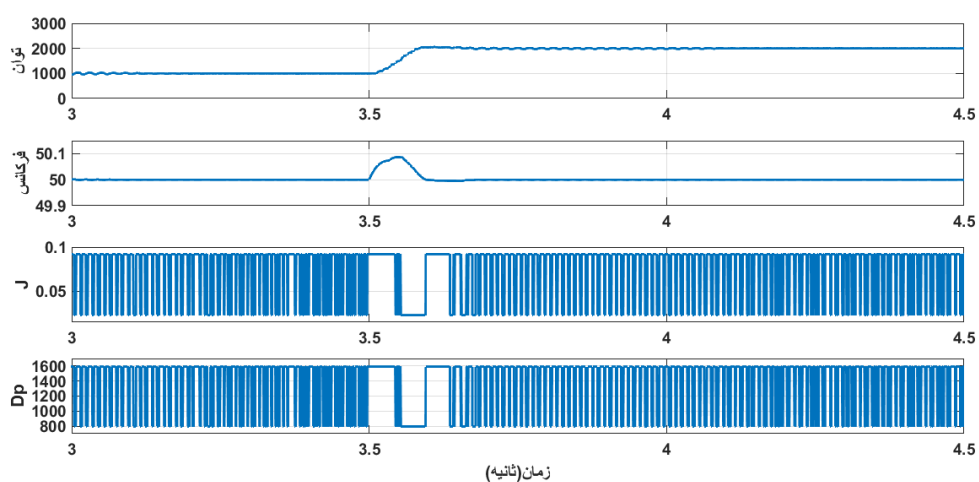
با توجه به هر دو شکل بالا مشخص است که با افزایش مقادیر J و D_p عملکرد سیستم به شدت نوسانی می‌شود و با کاهش آن‌ها اضافه جهش افزایش می‌یابد. در نتیجه بهترین پاسخ مربوط به مقادیر J و D_p ذکر شده در جدول (۳-۱) می‌باشد. شکل‌های (۴-۲۰) تا (۴-۲۴) روند تغییرات J و D_p ذکر شده در این بخش را نشان می‌دهند.



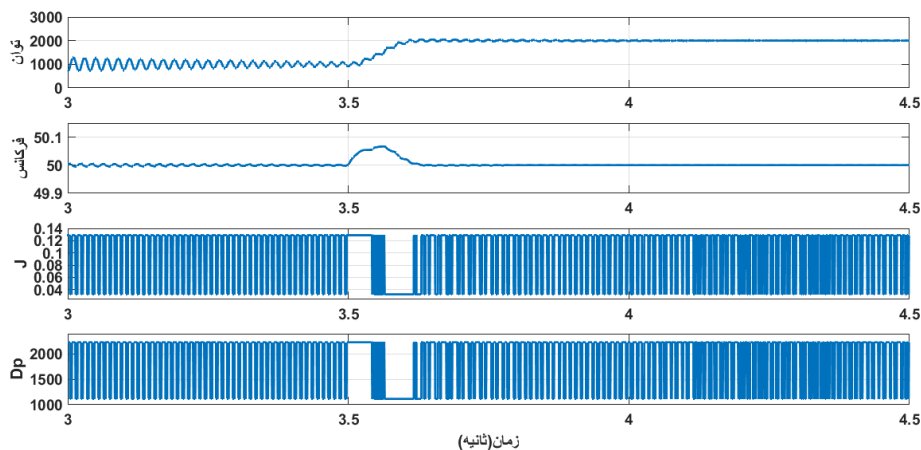
شکل ۴-۲۰: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۰,۶ برابر



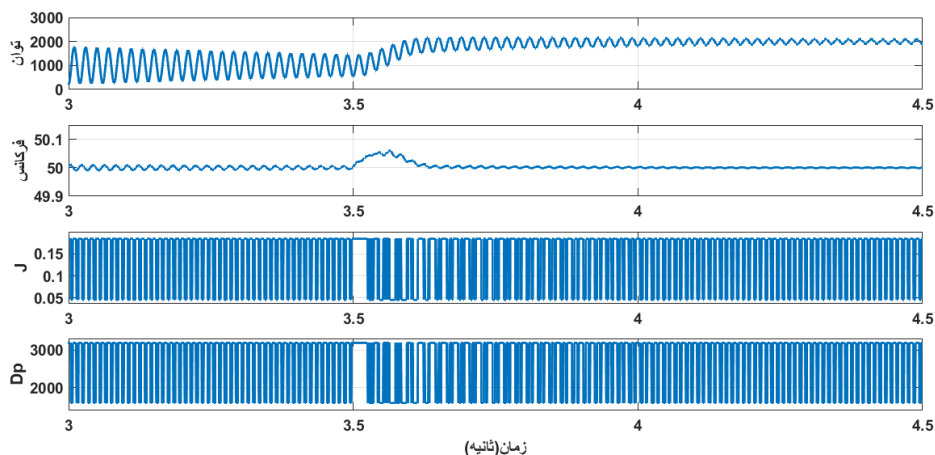
شکل ۴-۲۱: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۰,۸ برابر



شکل ۴-۲۲: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۱ برابر



شکل ۴-۲۳: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۱,۴ برابر



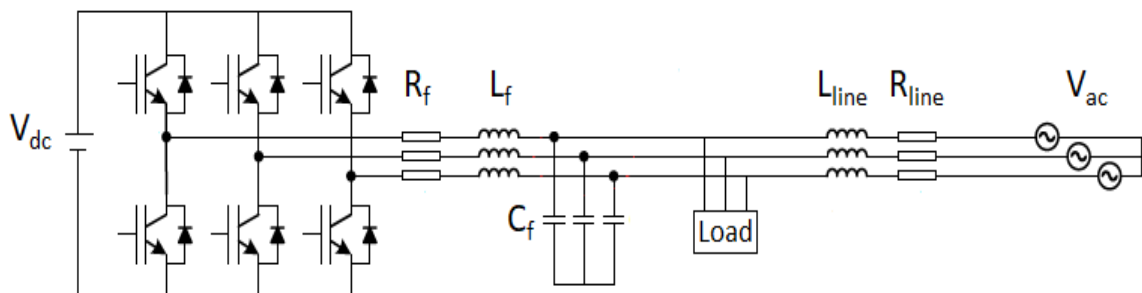
شکل ۴-۲۴: روند تغییرات J و D_p با ضریب ۲ برابر

۴-۲-۴ اجرای کنترل متناوبی J و D_p برای طرح VSG سه فاز

تا اینجا، طرح کنترل متناوبی بر روی VSG تکفاز اجرا شد. در این قسمت برای بررسی اثربخشی و تحقق عملکرد طرح کنترل متناوبی بر روی سایر سیستم‌های VSG، اجرای آن برای یک سیستم VSG سه فاز انجام خواهد شد. شکل (۴-۲۵) مدار قدرت یک VSG سه فاز را نشان می‌دهد. پارامترهای شبیه‌سازی سیستم سه فاز در جدول (۴-۳) آورده شده است.

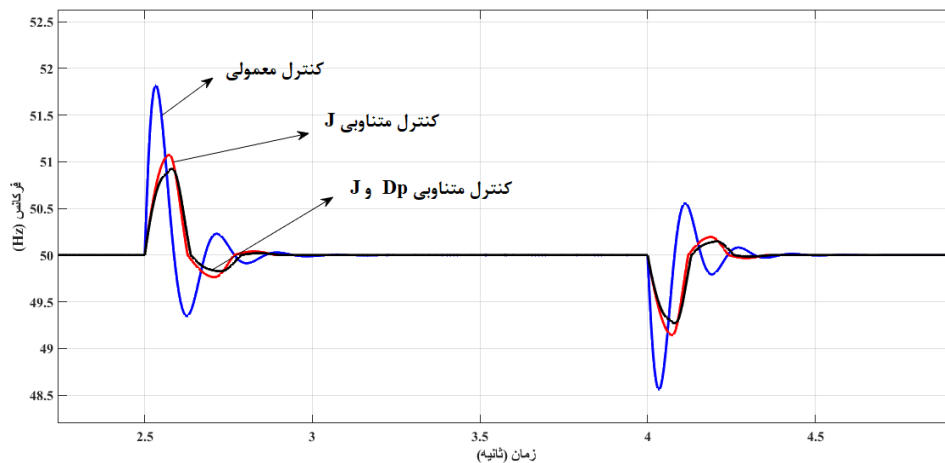
ابتدا VSG با توان مرجع ۱۵۰۰۰ وات و بدون بار در حال کار است. در زمان $t=2.5s$ توان مرجع به ۳۵۰۰۰ وات افزایش و سپس در $t=4s$ به ۲۰۰۰ وات کاهش می‌یابد. شکل‌های (۴-۲۶) و (۴-۲۷) به ترتیب

نشان‌دهنده فرکانس و توان خروجی VSG با هر سه استراتژی کنترلی می‌باشند. می‌توان یافت که طرح کنترل متناوبی برای VSG های سه فاز نیز معتبر می‌باشد و مشخص است که فقط مختص سیستم‌های تکفاز نمی‌باشد. شکل (۴-۲۸) نیز جریان خروجی VSG را با هر سه استراتژی کنترلی نشان می‌دهد، که مشخص است در حالت کنترل‌کننده معمولی اضافه جهش‌هایی در زمان اغتشاش در جریان شبکه به وجود می‌آید.

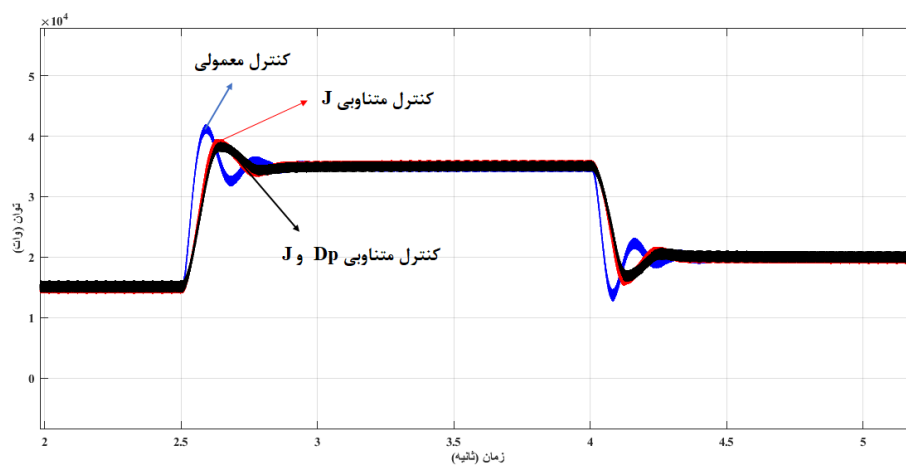


شکل ۴-۲۵: مدار قدرتی سیستم سه فاز مورد مطالعه
جدول ۴-۳: پارامترهای شبیه‌سازی سیستم سه فاز

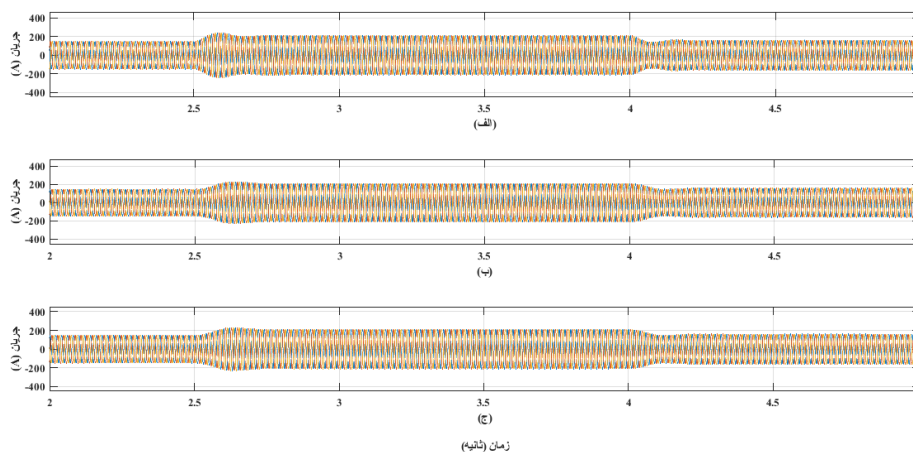
پارامتر	شاخصه	مقدار	واحد
ولتاژ باس DC	U_{dc}	۸۰۰	V
ولتاژ شبکه	U_{abc}	۲۲۰	V
فرکانس کلیدزنی	f_s	۵۰۰۰	Hz
فرکانس شبکه	f	۵۰	Hz
اندوکتانس سمت اینورتر	L_f	۱/۵	mH
مقاومت سمت اینورتر	R_f	۰/۰۵	Ω
اندوکتانس سمت شبکه	L_{line}	۱	mH
مقاومت سمت شبکه	R_{line}	۰/۱	Ω
خازن	C_f	۱۵۰	μf
J بزرگ	J	۰/۳۸۶	Kg.m ²
J کوچک	J	۰/۰۹۲	Kg.m ²
D_p بزرگ	D_p	۱۵۹۲/۳۳	W.rad/s
D_p کوچک	D_p	۷۹۶/۱۶	W.rad/s



شکل ۴-۲۶: شکل موج فرکانس شبکه با هر سه کنترل کننده



شکل ۴-۲۷: توان خروجی VSG سه فاز با هر سه کنترل کننده



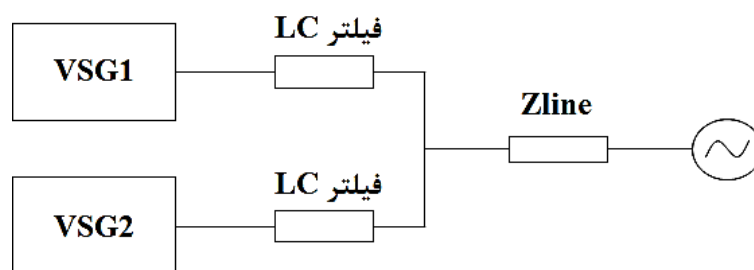
شکل ۴-۲۸: جریان شبکه. (الف) کنترل معمولی. (ب) کنترل متناوبی J. (ج) کنترل متناوبی J و Dp

۵-۲-۴ اجرای کنترل متناوبی بر روی طرح Multi-VSG

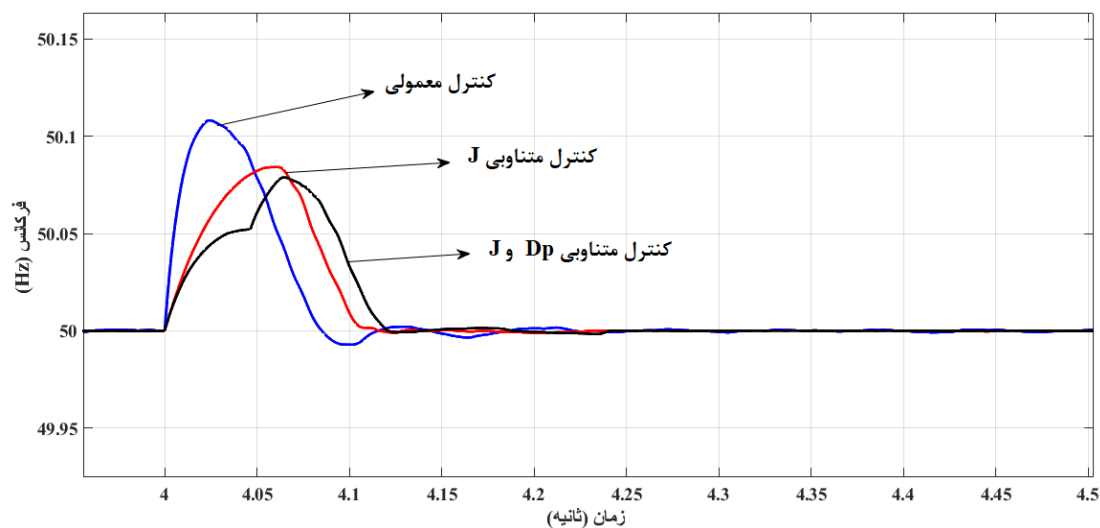
شکل (۴-۲۹) یک ریزشبه با دو VSG موازی را نشان می‌دهد. طرح کنترل متناوبی بر روی هر یک از VSG ها پیاده‌سازی شد. پارامترهای شبیه‌سازی همان پارامترهای مورد استفاده برای VSG تکفاز می‌باشد. VSG1 با توان ۸۰۰ وات و VSG2 با توان ۱۵۰۰ وات به صورت موازی با شبکه در حال کار هستند. در زمان $t=4s$ توان تولیدی VSG1 به ۱۴۰۰ وات افزایش و توان تولیدی VSG2 نیز به ۲۵۰۰ وات افزایش می‌یابد. شکل‌های (۴-۳۰) (الف) و (۴-۳۰) (ب) به ترتیب فرکانس سیستم VSG1 و VSG2 را نشان می‌دهند.

باتوجه به شکل (۴-۳۰)، فرکانس سیستم با کنترل متناوبی هم برای VSG1 و هم برای VSG2 دارای پاسخ بهتری است و از اضافه جهش کوچک و زمان نشست کوتاه‌تری برخوردار است. می‌توان دریافت که کنترل متناوبی سازگاری خوبی نیز با سیستم‌های دارای چند VSG دارد.

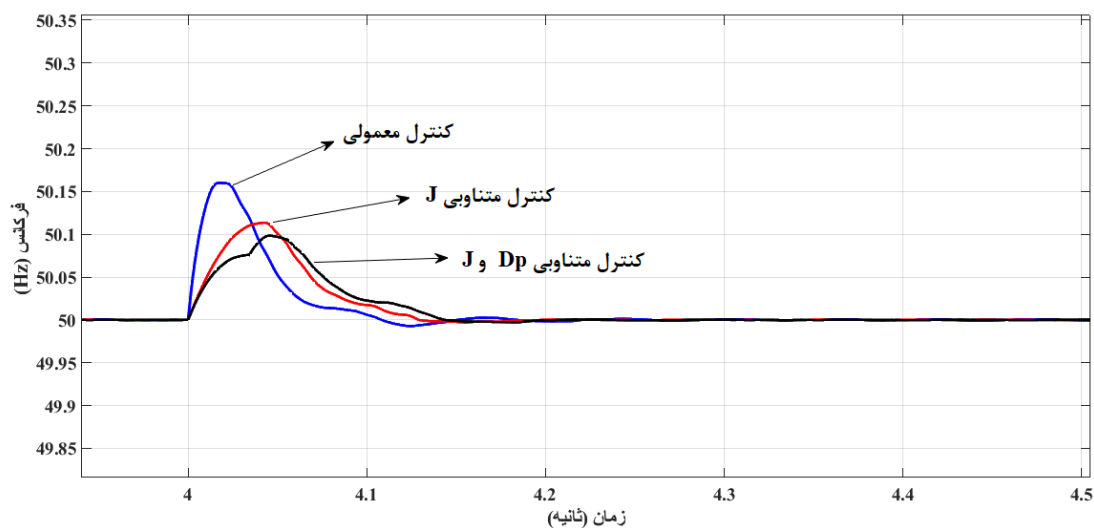
به‌عنوان یک نتیجه‌گیری، کنترل متناوبی یک کنترل‌کننده محلی (عدم نیاز ارتباط با واحدهای دیگر) است با عملکرد قابل قبول و همچنین سازگاری خوبی با انواع طرح‌های VSG دارد.



شکل ۴-۲۹: ریزشبه با دو VSG موازی



(الف)



(ب)

شکل ۴-۳: فرکانس سیستم. (الف) VSG1. (ب) VSG2

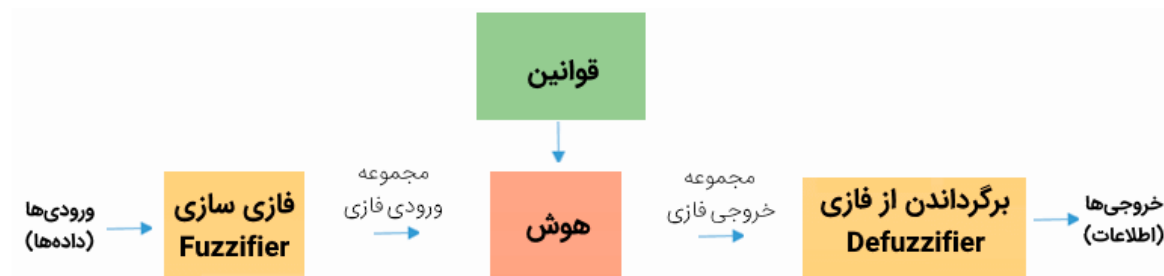
۴-۳ پیاده سازی اینرسی انعطاف پذیر به روش فازی

منطق فازی، امروزه به حل بسیاری از مسائل مربوط به تصمیم‌گیری‌ها کمک کرده است بطوری که در بیشتر مواقع، بهترین تصمیم را براساس ورودی‌ها تولید می‌کند. منطق فازی، بر مبنای تصمیم‌گیری‌های انسانی پایه‌ریزی شده است. بر خلاف منطق (باینری) یا (ارسطویی) که همه چیز را فقط به دو شکل سیاه

و سفید، بلی و خیر و صفر و یک می‌بیند، منطق فازی در بازه بین صفر و یک قرار داشته و با دوری از مطلق‌گویی (فقط صفر یا یک) از مقدار تعلق عضوی به مجموعه بحث می‌کند. برای مثال، یک فرد ۴۰ ساله، ۱۵ درصد به مجموعه جوانان، ۷۰ درصد به مجموعه میان‌سالان و ۲۵ درصد به مجموعه پیران تعلق دارد. این منطق مطلقاً نمی‌گوید که مثلاً فرد مورد نظر میان‌سال است (مجموع تعلق‌ها الزاماً برابر یک نیست). در تعریفی دیگر می‌توان گفت که منطق فازی نوعی روش استدلال است که به نحوه استدلال کردن انسان شباهت دارد. رویکرد منطق فازی از روش تصمیم‌گیری انسان‌ها تقلید می‌کند و در آن همه حالت‌های میانی ممکن بین مقادیر دیجیتالی “صفر” و “یک” در نظر گرفته می‌شوند.

۴-۳-۱ ساختار منطق فازی

منطق فازی دارای چهار بخش اصلی است که در شکل (۴-۳۱) نشان داده شده است و در ادامه به توضیح هریک از این بخش‌ها پرداخته خواهد شد.



شکل ۴-۳۱: ساختار کلی یک سیستم فازی

۴-۳-۱-۱ قوانین پایه

این بخش، شامل همه قاعده‌ها و شرایطی است که به صورت اگر/آنگاه توسط یک متخصص مشخص شده‌اند تا قادر به کنترل تصمیمات یک سیستم تصمیم‌گیری باشند. با توجه به روش‌های جدید در نظریه فازی، امکان تنظیم و کاهش قواعد و قوانین بوجود آمده است به طوری که با کمترین قوانین می‌توان

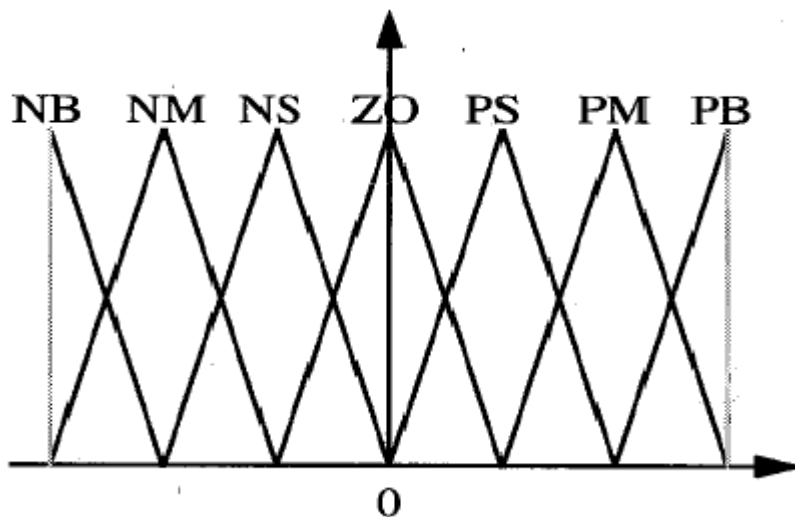
بهترین نتیجه را گرفت.

۲-۱-۳-۴ فازی سازی

در گام فازی سازی، ورودی‌ها به اطلاعات فازی تبدیل می‌شوند. به این معنی که اعداد و ارقام و اطلاعاتی که باید پردازش شوند، به مجموعه‌ها و اعداد فازی تبدیل خواهند شد. داده‌های ورودی که مثلاً توسط حسگرها در یک سیستم کنترل، اندازه‌گیری شده‌اند، به این ترتیب تغییر یافته و برای پردازش بر مبنای منطق فازی آماده می‌شوند. جدول (۴-۴) یک مثال فازی سازی ۷ حالتی را نشان می‌دهد و شکل (۴-۳۲) چگونگی توابع عضویت این جدول را نشان می‌دهد. توابع عضویت به شما اجازه می‌دهد تا یک واژه زبانی را کمی سازی کرده و یک مجموعه فازی را به صورت نموداری نمایش دهید.

جدول ۴-۴: نمونه یک فازی سازی ۷ حالتی

NB(Negative Big)	یک عدد مثبت بزرگ
NM(Negative Medium)	یک عدد مثبت متوسط
NS(Negative Small)	یک عدد مثبت کوچک
Z(Zero)	صفر
PS(Positive Small)	یک عدد منفی کوچک
PM(Positive Medium)	یک عدد منفی متوسط
PB(Positive Big)	یک عدد منفی بزرگ



شکل ۴-۳۲: یک نمونه توابع عضویت برای یک فازی سازی ۷ حالتی

۴-۳-۱-۳ موتور استنتاج یا هوش

در این بخش، میزان انطباق ورودی‌های حاصل از فازی سازی با قوانین پایه مشخص می‌شود. به این ترتیب براساس درصد انطباق، تصمیمات مختلفی به عنوان نتایج حاصل از موتور استنتاج فازی تولید می‌شود.

۴-۳-۱-۴ برگرداندن از فازی

در آخرین مرحله نیز نتایج حاصل از استنتاج فازی که به صورت مجموعه‌ها فازی هستند به داده‌ها و اطلاعات کمی و رقمی تبدیل می‌شوند. در این مرحله شما با توجه خروجی‌ها که شامل تصمیمات مختلف به همراه درصدهای انطباق‌های متفاوتی هستند، دست به انتخاب بهترین تصمیم می‌زنید. معمولاً این انتخاب بر مبنای بیشترین میزان انطباق خواهد بود.

در روش کنترل متناوبی تنظیم پارامتر J توسط کلیدهای دستوری صورت می‌گرفت. در این قسمت می‌خواهیم تنظیم J را به صورت منطق فازی که در بالا ذکر شد انجام دهیم.

در روش کنترل متناوبی، هنگام وقوع اغتشاش، با توجه به جدول (۴-۱) J بین دو مقدار J کوچک و J

بزرگ تغییر حالت می‌داد. اما در روش فازی در هنگام وقوع اغتشاش J به آرامی تغییر حالت می‌دهد و می‌تواند مقدار بهینه J را متناسب با میزان شدت اغتشاش تغییر حالت دهد (یعنی متناسب با پارامترهای ورودی که در کدام قسمت از توابع ورودی قرار گرفته‌اند یک J متناسب با آن استخراج شود). شکل (۴-۳۳) توابع عضویت ورودی‌های سیستم فازی (یعنی توابع عضویت $d\omega/dt$ و $\Delta\omega$) را نشان می‌دهد. هر کدام از ورودی‌ها شامل ۷ تابع عضویت به شکل گوسی می‌باشند.

توابع عضویت خروجی شامل ۱۱ مقدار J است که از J_1 تا J_{11} نام گذاری شده‌اند و به‌طور مساوی بین J کوچک و J بزرگ یعنی $0,023$ و $0,092$ تقسیم بندی شده‌اند. با توجه به شکل (۴-۹) همانطور که مشاهده می‌شود پس از حذف نوسانات مقدار J به دلیل وجود نوسانات بسیار کوچک در سیستم مدام در حال تغییر است که البته این موضوع ایرادی در نقطه کار پایداری سیستم به وجود نمی‌آورد اما بهتر است که VSG در هنگام کار در نقطه حالت پایدار با یک J ثابت کار کند. برای این منظور، در ادامه روشی برای حل این مسئله توسط فازی معرفی خواهد شد. در زمان‌های کار عادی (بدون اغتشاش) $d\omega/dt$ و $\Delta\omega$ تقریباً صفر هستند یا دارای علامت‌های مثبت/منفی بسیار کوچک هستند که برای این نواحی یک مقدار J میانی تعریف کرده‌ایم تا در شرایط کار عادی VSG با یک J ثابت کار کند. J_6 که مقدار آن $0,0575$ است، J میانی می‌باشد که برای ناحیه صفر (Z) در نظر گرفته شده است. نحوه تنظیم قوانین فازی در جدول (۴-۵) آورده شده است. پایگاه قواعد فازی در زیر نوشته شده است که به دلیل زیاد بودن تعداد قواعد که ۴۹ حالت است چند نمونه به عنوان مثال نوشته شده است:

پایگاه قواعد:

If ($d\omega/dt$ is NB) and ($\Delta\omega$ is PB) then (output is J_1)

If ($d\omega/dt$ is NM) and ($\Delta\omega$ is PB) then (output is J_2)

If ($d\omega/dt$ is NS) and ($\Delta\omega$ is PB) then (output is J_3)

If ($d\omega/dt$ is NS) and ($\Delta\omega$ is PM) then (output is J_4)

If ($d\omega/dt$ is PS) and ($\Delta\omega$ is NS) then (output is J_5)

If ($d\omega/dt$ is PM) and ($\Delta\omega$ is Z) then (output is J_6)

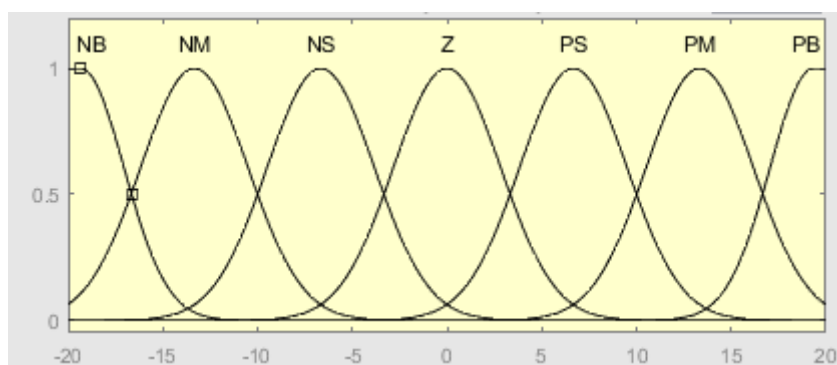
If ($d\omega/dt$ is PS) and ($\Delta\omega$ is PS) then (output is J_7)

If ($d\omega/dt$ is PM) and ($\Delta\omega$ is PS) then (output is J_8)

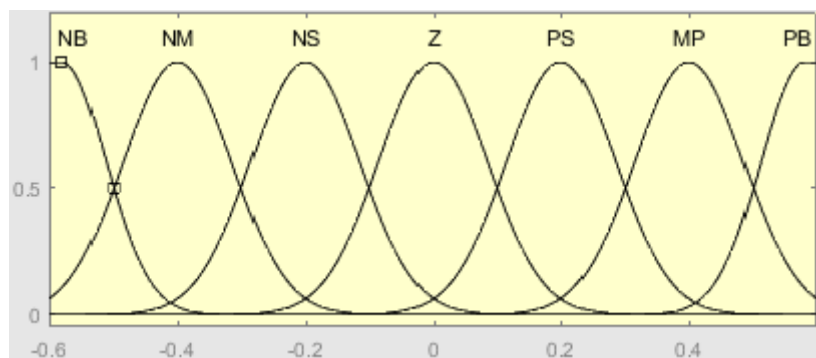
If ($d\omega/dt$ is NM) and ($\Delta\omega$ is NM) then (output is J_9)

If ($d\omega/dt$ is PB) and ($\Delta\omega$ is NM) then (output is J_{10})

If ($d\omega/dt$ is NB) and ($\Delta\omega$ is NB) then (output is J_{11})



(الف)



(ب)

شکل ۴-۳: توابع عضویت فازی. (الف) $d\omega/dt$. (ب) $\Delta\omega$

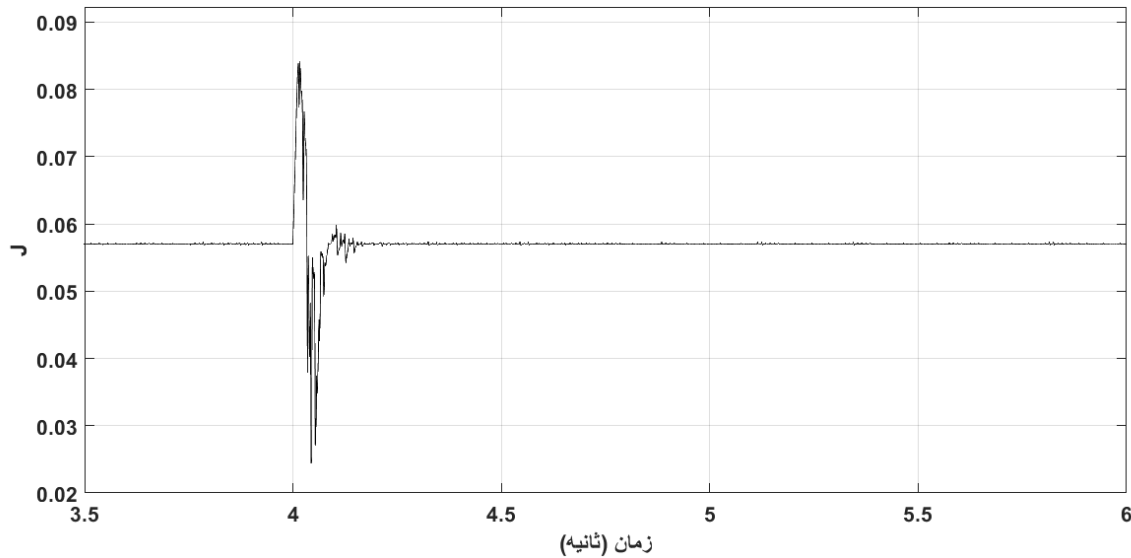
جدول ۴-۵: جدول قوانین فازی

		$d\omega/dt$						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$\Delta\omega$	NB	J_{11}	J_{10}	J_9	J_6	J_3	J_2	J_1
	NM	J_{10}	J_9	J_8	J_6	J_4	J_3	J_2
	NS	J_9	J_8	J_7	J_6	J_5	J_4	J_3
	Z	J_6	J_6	J_6	J_6	J_6	J_6	J_6
	PS	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9
	PM	J_2	J_3	J_4	J_6	J_8	J_9	J_{10}
	PB	J_1	J_2	J_3	J_6	J_9	J_{10}	J_{11}

باتوجه به جدول (۴-۵) همانطور که گفته شد ناحیه صفر، ناحیه کار عادی است که برای تمامی نواحی صفر J میانی در نظر گرفته شد. همچنین برای نواحی که اختلاف فرکانس زیاد باشد J با بیشترین حد مجاز یعنی بین $۰,۰۲۳$ و $۰,۰۹۲$ تغییر می کند تا سریع تر اغتشاش دمپ شود و همزمان با کم شدن اختلاف فرکانس J نیز به صورت پله ای به سمت J میانی حرکت می کند.

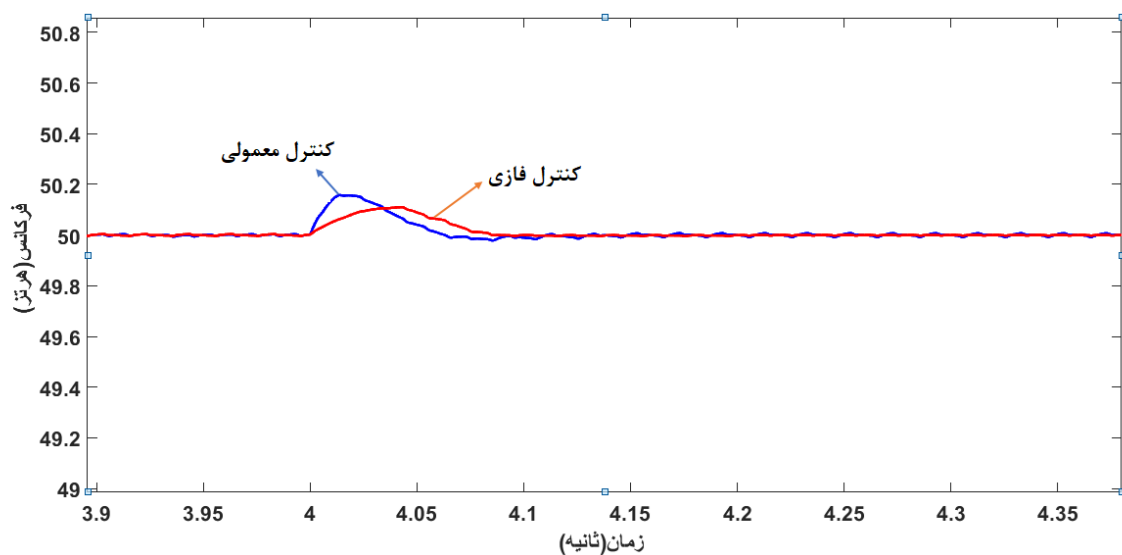
شکل (۴-۳۴) روند تغییرات J را به روش فازی پیشنهادی نشان می دهد. باتوجه به شکل، همانطور که مشخص است قبل از وقوع اغتشاش (قبل از ۴ ثانیه) بدلیل اینکه فرکانس ثابت است و هیچ گونه انحراف فرکانسی وجود ندارد $d\omega/dt$ و $\Delta\omega$ تقریباً صفر هستند یا دارای علامت های مثبت/منفی بسیار کوچک هستند که VSG با یک J ثابت (J_6) کار می کند. در زمان $t=4s$ توان تولیدی VSG از ۱۰۰۰ به ۲۰۰۰ وات افزایش پیدا می کند که یک اختلاف توان بین تولید و بار ایجاد می شود در نتیجه این اختلاف توان یک اختلاف فرکانسی را به وجود می آورد و مقادیر $d\omega/dt$ و $\Delta\omega$ در جهت مثبت/منفی زیاد می شوند. همانطور که در شکل دیده می شود در زمان $t=4s$ سیستم فازی متناسب با مقدار این اغتشاش J را تغییر

می‌دهد و تا زمانی که اغتشاش دمپ می‌شود مقدار J دوباره به مقدار اولیه خود باز می‌گردد.



شکل ۴-۳۴: نحوه تغییر J به روش فازی

شکل (۴-۳۵) فرکانس سیستم را در زمان ۴ ثانیه (وقوع اغتشاش) با هر دو روش فازی و معمولی نشان می‌دهد. باتوجه به شکل مشخص است که کنترل فازی دینامیک سیستم را بهبود می‌بخشد و در مهار اغتشاشات عملکرد بهتری دارد.



شکل ۴-۳۵: فرکانس سیستم با کنترل فازی و معمولی

۴-۴ بهبود پایداری VSG در شرایط وجود انحراف DC

همانطور که در ابتدای فصل گفته شد، SOGI برای هماهنگ‌سازی اینورترهای متصل به شبکه استفاده می‌شود و از ولتاژهای شبکه قادر به استخراج مولفه‌های اساسی با خروجی دو سیگنال سینوسی متعامد می‌باشد. با این حال، اگر یک انحراف DC در سیگنال‌های اندازه‌گیری ولتاژ و جریان وجود داشته باشد، SOGI عمومی تحت تأثیر این انحراف نمی‌تواند پارامترهای اصلی سیگنال‌ها را به درستی استخراج کند و با خطاهایی مواجه خواهد شد.

دلایلی که می‌توانند منجر به ایجاد انحراف DC در مبدل‌های متصل به شبکه شوند:

۱- نبود کالیبراسیون انحراف DC در واحد کنترل، عدم وجود مازول‌های حذف انحراف DC در

مسیرهای فیدبک جریان، تأثیر حرارتی در برخی از سنسورها و سایر سیستم‌های تحت تأثیر

(در صورتی که مبدل مجبور باشد به مدت طولانی کار کند).

۲- مسائلی از قبیل افت ولتاژ، ترانس اجزای فیلتر مانند سلف‌های ورودی و خازن، در برخی موارد

کاهش اندوکتانس و سایر پارامترهای مربوط به ترانسفورماتورها و

۳- مسائلی از قبیل حساسیت به مؤلفه DC در ولتاژ/جریان شبکه، اجرای یک PLL نامناسب

(گاهی اوقات اجرای یک PLL نامناسب باعث تزریق هارمونیک‌های اضافی در سیگنال‌های

مرجع جریان می‌شود)

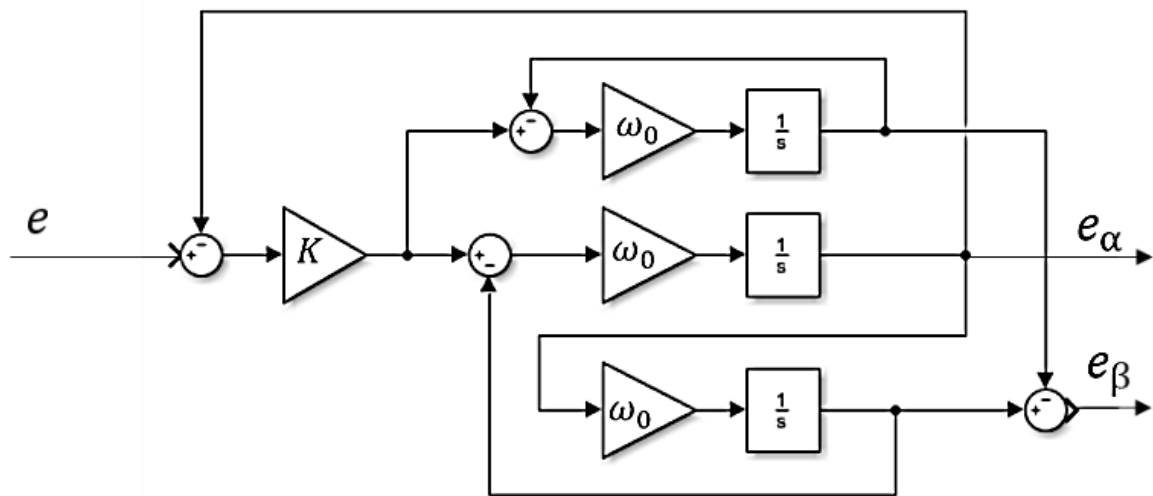
۴- کلیدزنی بارهای غیر خطی نزدیک به مبدل.

در [38] یک انتگرال‌گیر تعمیم‌یافته مرتبه سوم^۱ (TOGI) برای حذف این مؤلفه پیشنهاد شده است. با

اضافه کردن یک شاخه اضافی به SOGI می‌توان انحراف DC را در سیگنال‌های موجود در SOGI حذف

¹ Third-Order Generalized Integrator

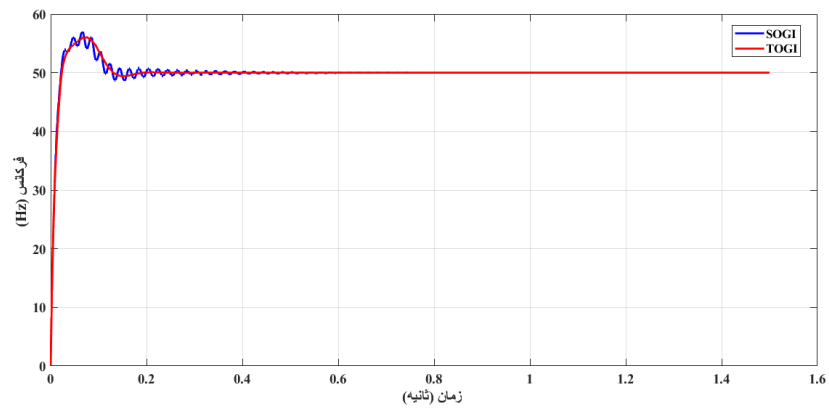
کرد. شکل (۴-۳۶) نشان‌دهنده یک TOGI است.



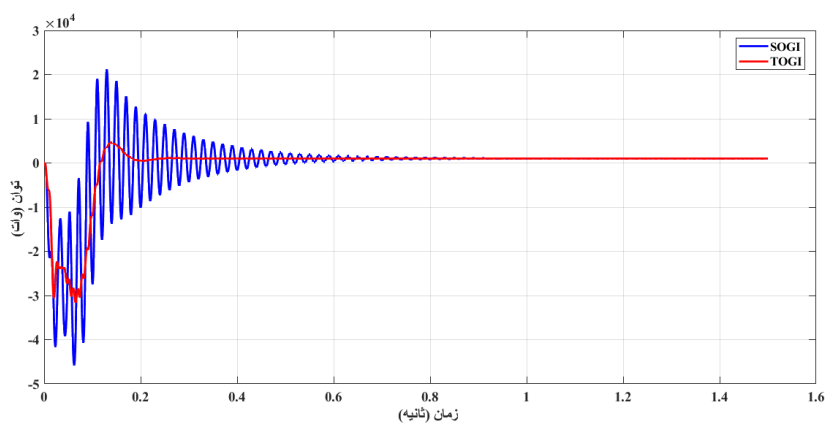
شکل ۴-۳۶: انتگرال‌گیر تعمیم یافته مرتبه سوم (TOGI)

در این قسمت توان VSG تکفاز توسط هر دو روش SOGI و TOGI محاسبه و نتایج شبیه‌سازی باهم مقایسه می‌شوند. شکل (۴-۳۷) فرکانس سیستم و شکل (۴-۳۸) توان خروجی یک VSG ۱۰۰۰ واتی را با محاسبه توان توسط SOGI و TOGI نشان می‌دهند. باتوجه به شکل‌های (۴-۳۷) و (۴-۳۸)، در حالت TOGI شکل موج‌ها، دینامیک بسیار صاف‌تری نسبت به حالت SOGI دارند به‌خصوص در شکل (۴-۳۸) دیده می‌شود که در مراحل اولیه همگام‌سازی (بین ۰ تا ۰,۶ ثانیه) اضافه جهش و زمان نشست کاهش چشمگیری داشته‌اند. این موضوع می‌تواند در بهبود پایداری سیستم بسیار مفید واقع شود.

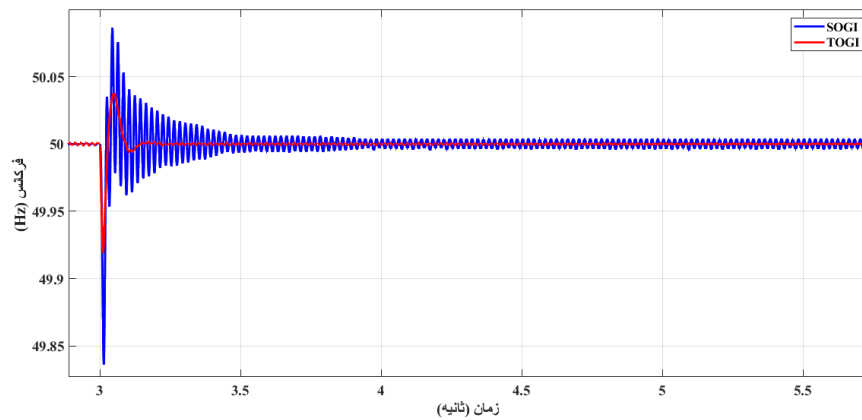
در زمان $t=3s$ یک مقدار انحراف DC به اندازه ۶۰ ولت به ولتاژ ترمینال VSG و یک مقدار انحراف DC دیگر نیز به اندازه ۶ آمپر به جریان ترمینال VSG وارد می‌شود. شکل‌های (۴-۳۹) و (۴-۴۰) به‌ترتیب فرکانس سیستم و توان خروجی VSG را نشان می‌دهند. همانطور که مشخص است پس از وارد شدن این انحرافات فرکانس و توان هر دو در حالت SOGI نوسانی شده‌اند این در حالی است که در حالت TOGI فرکانس و توان هر دو پس از یک نوسان کوچک به سرعت به حالت پایدار رسیده و سیگنال‌های مرجع خود را بدون نوسان دنبال می‌کنند.



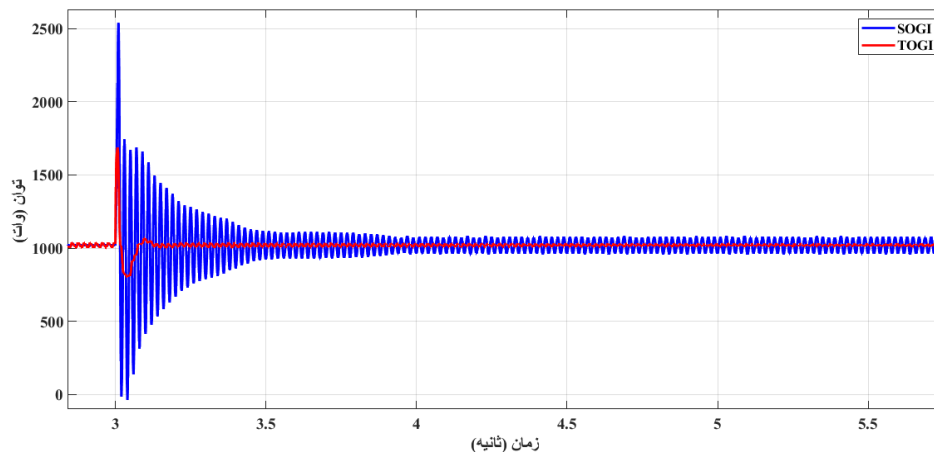
شکل ۴-۳۷: فرکانس سیستم



شکل ۴-۳۸: توان خروجی VSG



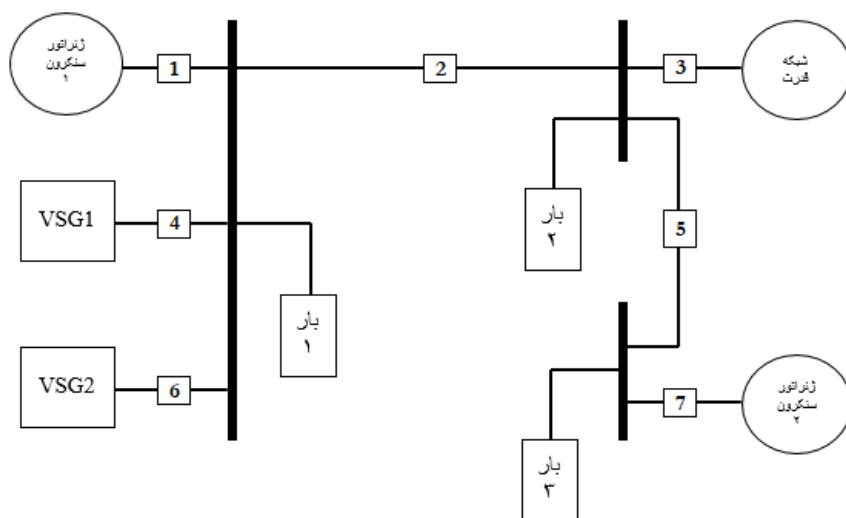
شکل ۴-۳۹: فرکانس سیستم با وجود انحراف DC



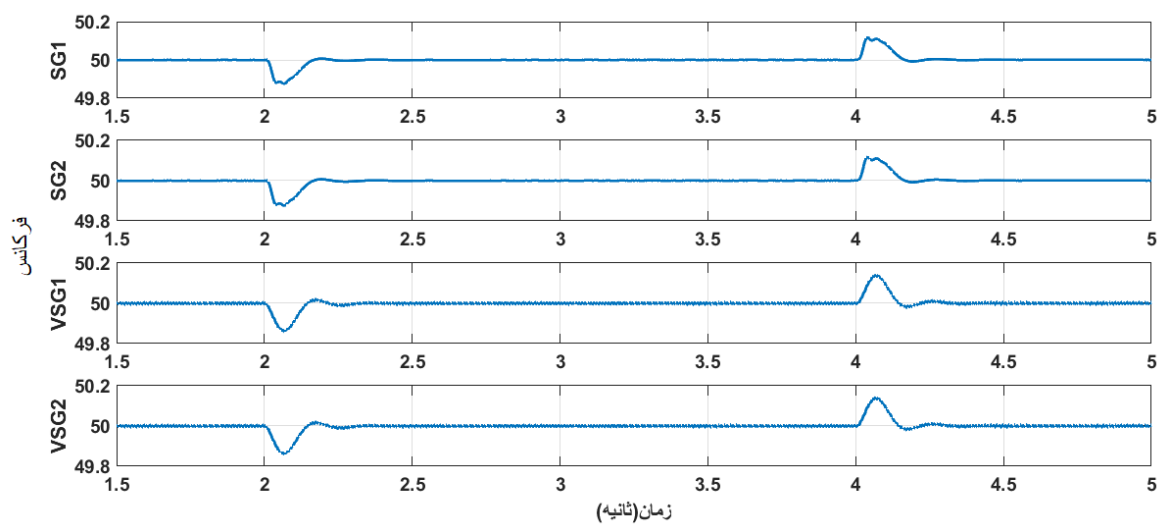
شکل ۴-۴: توان خروجی VSG با وجود انحراف DC

۴-۵ عملکرد VSG در یک ریزشبكة با وجود منابع دارای اینرسی واقعی

برای بررسی عملکرد VSG در کنار ژنراتورهای سنکرون که دارای اینرسی زیادی هستند در این بخش VSG در یک ریزشبكة که دارای ژنراتورهای سنکرون است شبیه‌سازی می‌شود. هدف تنظیم فرکانس توسط منابع تولیدی و کاهش انحراف فرکانسی در زمان ناعادلی است و آیا VSG‌ها می‌توانند در تنظیم فرکانس یک ریزشبكة دارای چند ژنراتور سنکرون مفید واقع شوند. ریزشبكة تحت آزمایش در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. این ریزشبكة شامل ۲ واحد VSG، ۲ واحد ژنراتور سنکرون و ۳ بار محلی می‌باشد. شبیه‌سازی تحت سناریو تغییر بار قرار خواهد گرفت که در زمان ۲ ثانیه بار شماره ۳ از مدار خارج و دوباره در زمان ۴ ثانیه به مدار وارد می‌شود. پارمترهای شبیه‌سازی این ریزشبكة در جدول (۴-۶) آورده شده است. باتوجه به شکل (۴-۴۲) همانطور که دیده می‌شود در زمان‌های رخداد عدم تعادل میان تولید و بار که منجر به انحراف فرکانس می‌شود VSG‌ها در کنار ژنراتورهای سنکرون می‌توانند به تنظیم فرکانس شبکه کمک کنند و با تزریق اینرسی مجازی در شبکه از انحراف بیشتر فرکانس جلوگیری کنند.



شکل ۴-۴۱: ریزش شبکه مورد مطالعه در این بخش



شکل ۴-۴۲: فرکانس ریزش شبکه فوق تحت آزمایش تغییر بار

جدول ۴-۶: پارامترهای شبیه‌سازی ریزشبکه فوق

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی	220V
فرکانس نامی	50Hz
توان ژنراتور ۱	10KVA
توان ژنراتور ۲	8KVA
اینرسی ژنراتور ۱	0.16
اینرسی ژنراتور ۲	0.14
فرکانس کلیدزنی اینورترها	14KHz
توان VSG1	8KW
توان VSG2	5KW
اندوکتانس فیلترها	1.5mH
ظرفیت خازن فیلترها	150μF
اینرسی VSG1 و VSG2	0.092
ضریب میرایی	796
بار ۱	10KW
بار ۲	5KW
بار ۳	20KW
پارامترهای خطوط	
۱	0.012+0.15j
۲	0.05+0.4j
۳	0.03+0.2j
۴	0.012+0.15j
۵	0.02+0.17j
۶	0.012+0.15j
۷	0.012+0.15j

۴-۶ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا مفهوم اینرسی انعطاف پذیر گفته شد و بر اساس آن یک طرح کنترل متناوبی معرفی شد و بر روی حالت‌های مختلف کاری از جمله: VSG تکفاز، VSG سه‌فاز و VSG‌های موازی بکار گرفته شد. شبیه‌سازی‌ها تحت دو سناریو تغییر توان تولیدی و بار در نرم‌افزار سیمولینک متلب مورد آزمایش قرار گرفتند. طرح کنترل متناوبی به‌خوبی با سایر طرح‌های VSG ذکر شده سازگار بود و توانست در سناریوهای نام برده دینامیک سیستم را بهبود ببخشد. همچنین یک طرح کنترل فازی جهت بهبود پایداری VSG و تنظیم بهینه مقدار J متناسب با شدت اغتشاش معرفی شد. در ادامه عملکرد VSG در مقابل حضور انحراف DC بررسی شد و یک روش جدید به نام TOGI برای حذف این مؤلفه بر روی VSG پیاده‌سازی شد و نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده موفقیت آمیز بودن طرح TOGI در بهبود پایداری VSG در شرایط انحراف DC بود. در فصل بعدی در مورد نتیجه‌گیری و پیشنهادات بحث خواهد شد.

فصل ۵ : نتایج و پیشنهادات

۱-۵ نتیجه گیری

در سیستم‌های قدرت مرسوم، توان الکتریکی عموماً توسط ژنراتورهای سنکرون که دارای روتور سنگین و دوار هستند تولید می‌شود لذا روتور این ژنراتورها از اینرسی زیادی برخوردار هستند. اخیراً با افزایش گرایش جهانی به استفاده از منابع تولید پراکنده/منابع انرژی تجدیدپذیر توان الکتریکی توسط منابع مختلف با ویژگی‌های متفاوت تولید می‌شود و اینگونه منابع معمولاً توسط ادوات الکترونیک قدرت به شبکه برق متصل می‌شوند در نتیجه اینرسی کلی شبکه کاهش می‌یابد که این موضوع موجب ایجاد چالش‌های جدیدی در سیستم قدرت می‌شود. با کاهش اینرسی، شبکه نسبت به اغتشاشات احتمالی که عمده آن افزایش و کاهش تولید و بار است حساس‌تر شده و تغییرات شدید فرکانسی را در مواقع اغتشاشی در پی خواهیم داشت. میزان این تغییرات با افزایش منابع تولید پراکنده در شبکه افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از روش‌هایی برای بهبود پایداری دینامیکی سیستم در چنین شرایطی امری ضروری به نظر می‌رسد.

در این پایان‌نامه، ابتدا به منظور افزایش اینرسی در یک ریزشبکه مفهوم VSG به‌طور خلاصه توضیح داده شد. VSG ها معادله نوسان معروف ژنراتورهای سنکرون را پیاده‌سازی می‌کنند. سپس در ادامه به بررسی تاثیر دو پارامتر کلیدی در معادله نوسان یعنی D_p و J بر عملکرد دینامیکی VSG پرداخته شد و بر اساس تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته یک استراتژی کنترلی برای بهبود پایداری دینامیکی VSG ارائه شد. طرح کنترلی برای انواع طرح‌های VSG (تکفاز، سه‌فاز و موازی) در محیط سیمولینک مطلب پیاده‌سازی شد و تحت دو سناریو (تغییر توان مرجع و تغییر بار) شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از موفقیت آمیز بودن طرح در بهبود پایداری دینامیکی و همچنین سازگاری آن با انواع طرح‌های VSG می‌باشد. همچنین یک TOGI معرفی شد و توسط آن پایداری VSG را تحت شرایط هارمونیک و انحراف DC بهبود بخشیدیم. از جمله تحقیقاتی که در این پایان‌نامه صورت گرفت پیشنهاد یک طرح کنترل فازی است که در بهبود پاسخ گذرای VSG مفید واقع شد و همچنین مقدار بهینه J را متناسب با شدت اغتشاش

تخمین می‌زند.

۵-۲ پیشنهادات

برای ادامه کار موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- ۱- همانطور که گفته شد در این پایان‌نامه هدف اصلی کنترل فرکانس بود، اما مؤلفه‌های کلیدی دیگر در شبکه مانند ولتاژ، جریان، کیفیت توان و ... مورد بحث قرار نگرفتند که می‌توانند اهداف مطالعات آینده باشند.
- ۲- استفاده از انواع مختلف منابع تجدیدپذیر نیز می‌تواند جنبه مطالعاتی آتی داشته باشد.
- ۳- مطالعات این پایان‌نامه صرفاً جنبه نظری و نرم‌افزاری داشته که اجرای طرح به صورت تجربی می‌تواند گزینه خوبی برای کارهای آتی باشد.

1. Bevrani, H., B. François, and T. Ise, *Microgrid dynamics and control*. 2017: John Wiley & Sons.
2. Zhong, Q.-C. and T. Hornik, *Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration*. Vol. 97. 2012: John Wiley & Sons.
3. Bevrani, H., Y. Mitani, and M. Watanabe, *Power system monitoring and control*. 2014: John Wiley & Sons.
4. Benoît Robyns, B.F., Gauthier Delille, Christophe Saudemont, *Energy Storage in Electric Power Grids*. 2015, Wiley.
5. Ghasemi, A., M. Banejad, and M. Rahimiyan, *Integrated energy scheduling under uncertainty in a micro energy grid*. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018. **12**(12): p. 2887-2896.
6. Lasseter, R.H., *Microgrids and distributed generation*. Journal of Energy Engineering, 2007. **133**(3): p. 144-149.
7. Katiraei, F., et al., *Microgrids management*. IEEE power and energy magazine, 2008. **6**(3): p. 54-65.
8. Zhang, Bo, Xiangwu Yan, and Sara Yahia Altahir. "Control design and small-signal modeling of multi-parallel virtual synchronous generators." 2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG). IEEE, 2017.
9. Shintai, Toshinobu, Yushi Miura, and Toshifumi Ise. "Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator." IEEE transactions on power delivery 29.2 (2014): 668-676.
10. Hart, D.W., *power electronics*. Pearson Education, Inc, 2010: p. 494.
11. Abbott, D., *Keeping the energy debate clean: How do we supply the world's energy needs?* Proceedings of the IEEE, 2010. **98**(1): p. 42-66.
12. Rashid, M.H., *Power electronics handbook*. 2017: Butterworth-Heinemann.
13. De La Rosa, F., *Harmonics and power systems*. 2006: CRC press Boca Raton.
14. Ise, T. and H. Bevrani, *Virtual synchronous generators and their applications in microgrids*, in *Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems*. 2016, Elsevier. p. 282-294.
15. Liu, Jia, et al. "Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids." IEEE Transactions on Smart Grid 8.5 (2016): 2268-2277.
16. Liu, J., et al., *Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids*. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017. **8**(5): p. 2268-2277.

17. Liu, Jia, Yushi Miura, and Toshifumi Ise. "Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators." *IEEE Transactions on Power Electronics* 31.5 (2015): 3600-3611.
18. De Brabandere, Karel, et al. "A voltage and frequency droop control method for parallel inverters." *IEEE Transactions on power electronics* 22.4 (2007): 1107-1115.
19. Alipoor, Jaber, Yushi Miura, and Toshifumi Ise. "Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia." *IEEE journal of Emerging and selected topics in power electronics* 3.2 (2014): 451-458.
20. Im, Won-Sang, et al. "Distributed virtual inertia based control of multiple photovoltaic systems in autonomous microgrid." *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 4.3 (2016): 512-519.
21. Bevrani, Hassan, and Jörg Raisch. "On virtual inertia application in power grid frequency control." *Energy Procedia* 141 (2017): 681-688.
22. Bevrani, Hassan. *Robust power system frequency control*. Vol. 85. New York: Springer, 2009.
23. Fang, Jingyang, et al. "Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters." *IEEE Transactions on Power Electronics* 33.10 (2017): 8488-8499.
24. Alipoor, Jaber, Yushi Miura, and Toshifumi Ise. "Distributed generation grid integration using virtual synchronous generator with adoptive virtual inertia." 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2013.
25. Bevrani, H., T. Ise, and Y. Miura, *Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014. **54**: p. 244-254.
26. Cheema, Khalid Mehmood. "A comprehensive review of virtual synchronous generator." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 120 (2020): 106006.
27. Liserre, Marco, Remus Teodorescu, and Frede Blaabjerg. "Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values." *IEEE transactions on power electronics* 21.1 (2006): 263-272.
28. Agorreta, Juan Luis, et al. "Modeling and control of N -paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants." *IEEE Transactions on Power Electronics* 26.3 (2010): 770-785.
29. Wen, Bo, et al. "Analysis of DQ small-signal impedance of grid-tied inverters." *IEEE Transactions on Power Electronics* 31.1 (2015): 675-687.
30. Fang, J., et al., *An improved virtual inertia control for three-phase voltage source converters connected to a weak grid*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018.
31. Zhu, X., et al., *Distributed virtual inertia control and stability analysis of dc microgrid*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018. **12**(14): p. 3477-3486.

32. Fang, J., et al., *Frequency derivative-based inertia enhancement by grid-connected power converters with a frequency-locked-loop*. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018.
33. Dhingra, K. and M. Singh, *Frequency support in a micro-grid using virtual synchronous generator based charging station*. IET Renewable Power Generation, 2018. **12**(9): p. 1034-1044.
34. Xi, J., et al., *Inertial response analysis of PMSG-based WECS with VSG control*. The Journal of Engineering, 2017. **2017**(13): p. 897-901.
35. Xi, J., et al., *Inertial response characteristics analysis and optimisation of PMSG-based VSG-controlled WECS*. IET Renewable Power Generation, 2018. **12**(15): p. 1741-1747.
36. Wang, F., et al., *An adaptive control strategy for virtual synchronous generator*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018. **54**(5): p. 5124-5133.
37. Chen, Junru, and Terence O'Donnell. "Analysis of virtual synchronous generator control and its response based on transfer functions." IET Power Electronics 12.11 (2019): 2965-2977.
38. Alipoor, J., Y. Miura, and T. Ise, *Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units*. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016. **9**(2): p. 1462-1471.
39. Huang, L., H. Xin, and Z. Wang, *Damping low-frequency oscillations through vsc-hvdc stations operated as virtual synchronous machines*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018. **34**(6): p. 5803-5818.
40. Ciobotaru, Mihai, Remus Teodorescu, and Frede Blaabjerg. "A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator." 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE, 2006.
41. Zhang, Chunjiang, et al. "A grid synchronization PLL method based on mixed second-and third-order generalized integrator for DC offset elimination and frequency adaptability." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 6.3 (2018): 1517-1526.

Abstract

In conventional power systems, power is often generated by high-inertial synchronous generators. This high inertia can prevent sudden and abrupt changes in frequency during network disruptions and maintain network stability. Nowadays, with the increase of the influence of renewable energy sources in the network that do not have inertia, the inertia of the network decreases and the sensitivity of the network to disturbances increases. Recently, virtual synchronous generator technology has been proposed that can provide virtual inertia for such sources, thus increasing network inertia.

In this dissertation, first the dynamic stability analysis of a virtual synchronous generator system is performed and then a control design is introduced based on the analyzes is performed for the realization and effectiveness of the control design .The virtual synchronous generator in the Matlab / Simulink environment is simulated. It is then tested under two scenarios of reference power change and load change. Also, control design is implemented for various types of virtual synchronous generator systems, namely: single-phase, three-phase and parallel. The simulation results indicate that the control design has been successful in improving the dynamic stability and its compatibility with various types of single-phase, three-phase and parallel virtual synchronous generator systems. Also, the performance of the virtual synchronous generator is examined in spite of the DC offset component in the system and a solution is provided to eliminate this component.

Keywords: Virtual synchronous generator, Dynamic stability, Renewable energy sources, Inverters, Virtual inertia



Shahrood University of
Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

Virtual Synchronous Machine Stability Analysis in a microgrid

By: Ramin Arjmandzadeh

Supervisor:
Dr. Mahdi Banejad

Advisor:
Dr. Ali Akbarzadeh Kalat

January 2021