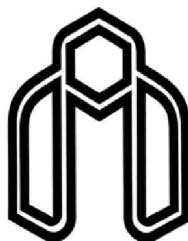


اسد الدین احمد



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی برق و رباتیک
گروه قدرت

عنوان:

طراحی و شبیه‌سازی اینورتر متصل به DG برای بهبود کیفیت توان در PCC

دانشجو: محمد عابدی نژاد

استاد راهنما:
دکتر علی دستفان

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲

ب



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۱۰۸۶/آ.ت.ب

تاریخ: ۹۲/۰۶/۲۵

ویرایش: -----

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای:

محمد عابدی نژاد رشته: برق گرایش: قدرت

تحت عنوان: طراحی و شبیه سازی اینورتر متصل به DG برای بهبود کیفیت توان در PCC

که در تاریخ ۹۲/۰۶/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: بسیار خوب امتیاز ۱۴/۸۴) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴) ✓

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	علی دستمالچی	استاد	
۲- استاد مشاور	-	-	-
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مرتضی رحیمیان	استاد	
۴- استاد ممتحن	مهدی بانواد	استاد	
۵- استاد ممتحن	مهدی پور	دانشیار	

رئیس دانشکده:

تقدیم بہ:

مادر مہربان، پدر بزرگوار و ہمسر مہربانم

کہ با محبت، ہمدلی و ہمراہی ایشان این موفقیت میسر کردید.

تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد گرانقدر و دلسوزم، جناب آقای دکتر علی دستفان، در تمام مراحل انجام این پایان نامه صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم. تشکر و قدردانی ویژه دارم از هم فکری و یاری دوستان عزیزم بویژه آقای مهندس فتاح حسن زاده که در به ثمر رسیدن این پایان نامه همواره یار و همراه بودند.

تعهد نامه

اینجانب محمد عابدی نژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق / قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و شبیه سازی اینورتر متصل مابین منابع تولید پراکنده و سیستم قدرت با هدف کاهش پدیده های کیفیت توان در نقطه اتصال تحت راهنمایی دکتر علی دستفان متعهد می شوم .

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

تاریخ ۱۳۹۲/۰۷/۲۵

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.

چکیده

امروزه، منابع تولید پراکنده به منظور تولید توان‌های اکتیو و راکتیو جهت تزریق به شبکه و تأمین بار محلی در نقطه PCC مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، با کنترل مناسب توان راکتیو تزریقی به شبکه می‌توان پروفایل ولتاژ و پارامترهای کیفیت توان را نیز بهبود بخشید. از این رو، منابع تولید پراکنده اغلب مشکلات سیستم‌های توزیع را حل کرده و نیاز به استفاده از جبران‌سازهای توان راکتیو را نیز مرتفع می‌سازند. یکی از منابع پرکاربرد در این راستا، توربین‌های بادی می‌باشند. از طرفی، این منابع جهت اتصال به شبکه به مبدل‌های الکترونیک قدرت نیاز دارند. بنابراین، در این مطالعه، استفاده از روش‌های کنترلی مختلف بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت مورد بررسی قرار گرفته است.

سیستم مورد بررسی در این پایان نامه از یک توربین بادی به همراه یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم تشکیل شده که از طریق مبدل Back to Back (B2B) به شبکه‌ای ضعیف متصل است. در این سیستم، با استفاده از کنترل‌کننده‌های صحیح برای مبدل‌ها، ولتاژ لینک DC تثبیت گردیده و حداکثر توان اکتیو از توربین بادی به شبکه تحویل داده خواهد شد. همچنین، با کنترل مناسب روند کلیدزنی مبدل سمت شبکه، توان راکتیو تولیدی سیستم نیز به منظور بهبود ولتاژ شبکه مخصوصاً در مواقع رخداد خطا یا اضافه بار کنترل می‌شود. به منظور دستیابی به اهداف فوق، ابتدا انرژی تولیدی با استفاده از یک یکسوکننده شش پالسه قابل کنترل از AC به DC تبدیل شده و به لینک DC تزریق می‌شود. سپس، جریان تزریقی به لینک DC توسط یک اینورتر از نوع منبع ولتاژی به جریان AC هم‌فرکانس با شبکه تبدیل گردیده و به آن تحویل داده خواهد شد. کنترل روند کلیدزنی هر دو مبدل موجود در این سیستم، با استفاده روش PWM انجام می‌پذیرد. در انتها، شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب/سیمولینک انجام گردیده و نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: منابع تولید پراکنده، مبدل Back to Back، جبران‌سازی ولتاژ، کنترل توان راکتیو.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: معرفی تولیدات پراکنده

۱-۲	مقدمه.....	۷
۲-۲	علل رویکرد به منابع تولید پراکنده در ایران.....	۷
۳-۲	تعریف منابع تولید پراکنده.....	۸
۴-۲	برخی از انواع تولیدات پراکنده و نحوه اتصال آن ها به شبکه.....	۱۳
۵-۲	اهداف استفاده از تولید پراکنده.....	۱۶
۶-۲	معایب استفاده از DG	۱۷
۷-۲	مقایسه کلی انواع تکنولوژی ها و فن آوری ها.....	۱۹

فصل سوم: تاثیر DG بر پروفیل ولتاژ و تلفات

۱-۳	مقدمه.....	۲۴
۲-۳	شاخص بهبود پروفایل ولتاژ.....	۲۴
۳-۳	تامین توان راکتیو.....	۲۵
۴-۳	ولتاژ گذرا در هنگام اتصال DG به شبکه.....	۲۹
۵-۳	تاثیر DG روی کنترل ولتاژ.....	۳۲
۶-۳	حالت گذرا و DG	۳۴
۷-۳	تاثیر DG بر تلفات توان.....	۳۵
۸-۳	خلاصه فصل.....	۳۸

فصل چهارم: روش های کنترل جریان دراینورتر منبع ولتاژ

۴-۱	مقدمه	۴۰
۴-۲	مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری (<i>SVPWM</i>)	۴۰
۴-۳	کنترل مدولاسیون پهنای پالس هیستریزیس	۴۲
۴-۳-۱	کنترل جریان باند هیستریزیس با کلیدزنی دو قطبی (<i>bipolar</i>)	۴۴
۴-۴	مدولاسیون پهنای پالس سینوسی <i>spwm</i>	۴۵
۴-۵	سیستم تولید پراکنده <i>DG</i> با اینورتر سه فاز در حالت متصل به شبکه	۴۶
۴-۶	اعمال روش کنترل جریان هیستریزیس به اینورتر	۴۷
۴-۷	اعمال روش مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی <i>SVPWM</i> به اینورتر	۵۴
۴-۸	خلاصه فصل	۵۷

فصل پنجم: شبیه سازی

۵-۱	مقدمه	۶۰
۵-۲	تشریح روش کنترلی و مدلسازی اجزا	۶۰
۵-۲-۱	مدلسازی و کنترل مبدل سمت ژنراتور <i>PMSG</i>	۶۱
۵-۲-۲	مدلسازی و کنترل مبدل سمت شبکه	۶۹
۵-۳	روش مدولاسیون	۷۴
۵-۴	فلوچارت سیستم کنترلی	۷۴
۵-۵	شبیه سازی و ارائه نتایج	۷۵
۵-۵-۱	شبیه سازی سیستم معرفی شده در شرایط کارعادی	۷۷
۵-۵-۲	شبیه سازی سیستم معرفی شده در شرایط خطا	۸۱
۵-۶	خلاصه فصل	۸۶

۵-۷	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات	۸۷
-----	---------------------------------	----

فهرست شکلها

- شکل ۳-۱ رفتار خط انتقال در ارتباط با توان راکتیو ۲۶
- شکل ۳-۲. یک فیدر نمونه ۲۷
- شکل ۳-۳ ولتاژ DG قبل و بعد از اتصال به شبکه ۲۸
- شکل ۳-۴. ولتاژ باس ۹ ۲۸
- شکل ۳-۵. ولتاژ باس ۱۰ ۲۹
- شکل ۳-۶. ولتاژ باس ۵ ۲۹
- شکل ۳-۷. ولتاژ باس ۱۰ ۳۰
- شکل ۳-۸. ولتاژ باس ۱ ۳۱
- شکل ۳-۹. ولتاژ باس ۱۰ ۳۱
- شکل ۳-۱۰. فیدر توزیع ۳۴
- شکل ۳-۱۱. شبکه شعاعی ۳۶
- شکل ۳-۱۲. فیدر شعاعی با منبع ۴۰۰ کیلوواتی در باس B ۳۷
- شکل ۳-۱۳. فیدر شعاعی با منبع ۶۰۰ کیلوواتی در باس B ۳۷
- شکل ۳-۱۴. فیدر شعاعی با منبع ۶۰۰ کیلوواتی در باس C ۳۸
- شکل ۴-۱. نمایش اینورتر منبع ولتاژ سه فاز با سوئیچهای دو وضعیته ۴۱
- شکل ۴-۲. بردارهای کلیدزنی و $sector$ های شش گانه اینورتر منبع ولتاژ سه فاز ۴۱
- شکل ۴-۳. کنترل جریان هیستریزیس، شماتیک حالت‌های کلیدزنی ۴۳
- شکل ۴-۴. ساختار یک اینورتر تک فاز تمام پل ۴۴
- شکل ۴-۵. کنترل جریان باند هیستریزیس با کلیدزنی دو قطبی (a) : اعمال پالس به سوئیچها (b) : ۴۵
- شکل موج جریان کنترل شده با باندهای بالا و پایین و ولتاژ دو قطبی ۴۵

- تصویر ۴-۶: نمای شماتیک از ایجاد پالس ۴۶
- شکل ۴-۷. اینورتر سه فاز متصل به شبکه ۴۷
- شکل ۴-۸. بلوک دیاگرام روش کنترل جریان هیستریزس تطبیقی پیشنهاد شده اعمال شده به اینورتر ۴۸
- شکل ۴-۹. موجهای جریان و ولتاژ با کنترل جریان هیستریزس ۵۰
- شکل ۴-۱۰. بلوک دیاگرام محاسبه پهنای باند هیستریزس تطبیقی ۵۲
- شکل ۴-۱۱. نتایج شبیه سازی حالت پایدار کنترلر جریان هیستریزس تطبیقی a ولتاژ شبکه در PCC جریان شبکه c . جریان فاز خروجی اینورتر d . باند هیستریزس ۵۳
- شکل ۴-۱۲. نتایج شبیه سازی حالت گذرا کنترلر جریان هیستریزس تطبیقی a ولتاژ شبکه در PCC جریان شبکه c . جریان فاز خروجی اینورتر d . باند هیستریزس e ولتاژ خط dc ۵۴
- شکل ۴-۱۳. بلوک دیاگرام روش کنترل جریان $SVPWM$ اعمال شده به اینورتر ۵۵
- شکل ۴-۱۴. نتایج شبیه سازی حالت پایدار کنترلر جریان $SVPWM$ a ولتاژ شبکه در PCC جریان شبکه c . جریان فاز خروجی اینورتر ۵۶
- شکل ۴-۱۵. نتایج شبیه سازی حالت گذرا کنترلر جریان هیستریزس تطبیقی a ولتاژ شبکه در PCC جریان شبکه c . جریان فاز خروجی اینورتر d ولتاژ خط dc ۵۶
- شکل ۴-۱۶. THD جریان شبکه برای کنترلر جریان هیستریزس تطبیقی ۵۷
- شکل ۴-۱۷. THD جریان شبکه برای کنترلر جریان $SVPWM$ ۵۷
- شکل ۵-۱. شماتیک مدار شبیه سازی شده در فضای سیمولینک/متلب ۶۲
- شکل ۵-۲. الف- ساختار مداری مبدل ولتاژ مرجع ($Voltage Source$) و ب- ساختار مداری مبدل جریان مرجع ($Current Source$) ۶۴
- شکل ۵-۳. مدار کنترلی قسمت I_d استاتور ۶۶

- شکل ۴-۵. مدار کنترلی قسمت i_q استاتور ۶۷
- شکل ۵-۵. مدار مربوط به سوئیچینگ کلید های مبدل سمت ژنراتور ۶۸
- شکل ۶-۵. شماتیک کلی مدار کنترلی سمت توربین بادی و ژنراتور سنکرون ۶۸
- شکل ۷-۵. مدل فیلتر پایین گذر خروجی اینورتر قدرت ۷۰
- شکل ۸-۵. مربوط به مدار کنترلی محور d برای تزریق توان و ثابت نگه داشتن ولتاژ dc ۷۱
- شکل ۹-۵. شماتیک مدار کنترلی محور q برای تزریق توان راکتیو ۷۲
- شکل ۱۰-۵. مدار مربوط به سوئیچینگ کلید های مبدل سمت اینورتر و شبکه ۷۳
- شکل ۱۱-۵. مربوط به شماتیک کلی مدار کنترلی اینورتر سمت شبکه ۷۳
- شکل ۱۲-۵. مدولاسیون پهنای پالس ۷۴
- شکل ۱۳-۵. ولتاژ لینک DC ۷۸
- شکل ۱۴-۵. توان تزریقی DG به شبکه ۷۸
- شکل ۱۵-۵. توان تزریقی DG به شبکه ۷۹
- شکل ۱۶-۵. جریان تزریقی DG به شبکه ۷۹
- شکل ۱۷-۵. ولتاژ در نقطه PCC با وجود خطا و بدون حضور DG ۸۰
- شکل ۱۸-۵. افزایش جریان از سوی DG در زمان رخداد خطا ۸۰
- شکل ۱۹-۵. افزایش توان راکتیو تزریقی از سوی DG در زمان رخداد خطا ۸۰
- شکل ۲۰-۵. ولتاژ نقطه PCC قبل و بعد از رخداد خطا ۸۱
- شکل ۲۱-۵. تغییرات ولتاژ لینک DC ۸۲
- شکل ۲۲-۵. مقدار جریان خطا ۸۲
- شکل ۲۳-۵. مقدار جریان تزریقی اینورتر با جود خطا در لحظه $s \ 5/0=t$ ۸۳
- شکل ۲۴-۵. مقدار بهبود $\%7$ ولتاژ در نقطه PCC با وجود خطا در لحظه $s \ 5/0=t$ ۸۳

شکل ۵-۲۵. مقدار تغییرات توان اکتیو تزریقی اینورتر با جود خطا در لحظه $t = 0/5$ S ۸۴

شکل ۵-۲۶. مقدار تغییرات توان راکتیو تزریقی اینورتر با جود خطا در لحظه $t = 0/5$ S ۸۴

شکل ۵-۲۷. مقدار THD ولتاژ در نقطه PCC با وجود خطا در $t = 0/5$ ثانیه و بدون حضور DG با مقدار

پیک ولتاژ ۲۷۵ در لحظه خطا ۸۵

شکل ۵-۲۸. مقدار THD ولتاژ در نقطه PCC با وجود خطا در $t = 0/5$ ثانیه و با حضور DG با مقدار

پیک ولتاژ ۲۹۵ در لحظه خطا ۸۵

فهرست جدول ها

- جدول (۲-۱) انواع فن آوریهای بکاررفته در تولید پراکنده ۲۰
- جدول (۲-۲) مشخصات انواع فن آوریهای مختلف تولید پراکنده ۲۱
- جدول (۲-۳) تواناییهای انواع فن آوریها ۲۲
- جدول ۳-۱. انواع جبران کننده ها و مزایا و معایب آن ها ۲۶
- جدول ۳-۲. اطلاعات فیدر توزیع نمونه ۲۸
- جدول ۳-۳. استانداردها ۳۲
- جدول ۳-۴. ویژه گی های خطوط هوایی ۱۱ کیلوولت ۳۲
- جدول ۵-۱- پارامترهای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۷۶
- جدول ۵-۲- اطلاعات و داده های مربوط به شبکه شبیه سازی شده ۷۷

فصل اول

مقدمه

یکی از راه‌کارهایی که در تأمین تقاضای انرژی مشتریان مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از منابع تولید پراکنده می‌باشد. با پیشرفت روزافزون سطح تقاضای مصرف‌کنندگان در جهت تأمین انرژی الکتریکی و با توجه به اثرات منابع تولید پراکنده بر روی شبکه‌ی توزیع، مطالعه و بررسی بر روی این منابع از اهمیت زیادی برخوردار گردیده است. از جمله مواردی که در استفاده از منابع تولید پراکنده در این مبحث می‌توان به آن اشاره داشت بحث کیفیت توان می‌باشد. ولتاژ و توان راکتیو در شبکه قدرت بایستی در یک محدوده مجاز حفظ و کنترل شود. بدین منظور ژنراتورها بایستی در رنج مطلوبی از ضریب توان کار کنند تا از افت ولتاژ در موقع پیک بار و یا افزایش ولتاژ در موقع کاهش مصرف جلوگیری به عمل آید. این تنظیمات در صورتی که تجهیزات لازم برای کنترل تولید پراکنده در شبکه نصب باشد قابل انجام می‌باشد. همچنین استفاده از منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع باعث کاهش بار مصرفی شبکه از دید شرکت تولیدکننده برق می‌شود.

امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده تنها برای دستیابی به هدف تأمین انرژی مورد نظر نمی‌باشد؛ بلکه در کنار این هدف، اتصال این منابع با اهداف گوناگون مورد توجه قرار گرفته است. یکی از اهداف اصلی اتصال منابع تولید پراکنده، علاوه بر تزریق حداکثر توان به سمت شبکه و بار، تزریق توان راکتیو در نقطه اتصال مشترک بین شبکه و منابع تولید پراکنده (PCC)¹ برای بهبود پروفایل ولتاژ و بهبود پارامترهای کیفیت توان می‌باشد. از این رو، DG² اغلب مشکلات سیستم‌های توزیع را حل کرده و می‌تواند به جای بسیاری از جبران‌سازها جایگزین شود.

یکی از منابع پر کاربرد به منظور ایجاد سیستم DG، توربین‌های بادی می‌باشند. از طرفی استفاده از این منابع به منظور تزریق توان به شبکه نیازمند استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌باشند. از این رو استفاده از روش‌های کنترلی مختلف بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت مورد بررسی قرار گرفته است.

¹ Point common connection

² Distributed Generation

اخیراً مطالعات گوناگونی در زمینه‌ی کنترل مبدل $B2B$ صورت گرفته است. در [۱۹] مبدل $B2B$ بر پایه‌ی معادلات حالت و عملکرد دینامیکی در طول خطاهای متقارن و نامتقارن و تغییرات پله‌ای توان اکتیو و راکتیو مورد استفاده قرار گرفته است. در [۲۰] مطالعه‌ی بر روی سیستم تولید توان بادی همراه با مبدل $B2B$ صورت گرفته است که در آن از استراتژی کنترل برداری بدون سنسور استفاده شده است. در [21] کنترل مبدل $B2B$ بر روی سیستم بادی با استفاده از روش کنترل برداری جریان مستقیم صورت گرفته است که در آن اهداف کنترلی توربین تحت سرعت‌های باد متغیر و ثابت صورت گرفته است. با بررسی موارد فوق مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده در کارهای دیگران که شامل ردیابی توان مرجع و ولتاژ لینک DC می‌باشند، دارای ریبیل بالایی نسبت به مراجع توان اکتیو و راکتیو و ولتاژ لینک DC مورد نظر بوده و در کل ردیابی مراجع به خوبی صورت نگرفته است.

در سیستم مورد مطالعه در این پایان‌نامه، توربین بادی شامل یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ($PMSG$)^۱ از طریق مبدل ($B2B$) با توجه به هدف تزریق حداکثر توان تولیدی توربین بادی به شبکه و کنترل توان راکتیو برای بهبود وضعیت شبکه و همچنین تثبیت ولتاژ لینک DC به شبکه‌ای ضعیف متصل می‌باشد. شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب/سیمولینک انجام و نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در روش کنترلی مورد استفاده بر روی این مبدل به منظور دستیابی به اهداف فوق ابتدا انرژی تولیدی با استفاده از یک یکسو کننده تمام کنترل شونده شش پالسه از حالت AC به DC تبدیل شده و به لینک DC تزریق می‌شود، سپس انرژی موجود در لینک DC توسط اینورتر منبع ولتاژی به سمت شبکه به صورت سنکرون با شرایط ولتاژ و فرکانس شبکه به AC تبدیل شده و به شبکه تزریق می‌گردد که برای ایجاد پالس به منظور کنترل سوئیچ‌های مبدل منبع ولتاژ از روش مدولاسیون پهنای باند (PWM)^۲ استفاده شده است.

¹ Permanent magnet synchronous generator

² Puls with modulation

در این سیستم وقوع خطا در نقطه اتصال منبع DG به شبکه، باعث افت ولتاژ می‌شود. لذا برای جبران این افت ولتاژ باید تمهیداتی اندیشید. یکی از راه‌های جبران افت ولتاژ استفاده از جبران‌سازهای استاتیکی توان راکتیو، همانند بانک خازنی، راکتور کنترل شونده با تریستور و کندانسورهای سنکرون، می‌باشد. اما استفاده از این جبران‌سازها در شبکه دارای ایراداتی از قبیل هزینه‌ی بالای نگهداری، تولید هارمونیک‌های مخرب، کنترل پیچیده و ... می‌باشد. همچنین استفاده از جبران‌سازهای فوق نسبت به جبران‌سازهای دینامیکی، DG ها، دارای ثابت زمانی بالایی می‌باشند؛ که خود باعث بروز مشکلاتی از قبیل عدم تعادل در شبکه را منجر می‌شوند. لذا استفاده از جبران‌سازهای دینامیکی مانند منابع تولید پراکنده‌ی موجود در شبکه، به منظور جبران افت ولتاژ با توجه به سرعت عمل بالا نسبت به جبران‌سازهای استاتیکی توصیه می‌شود. برای انجام این کار باید با کنترل منابع تولید پراکنده این امر را تحقق بخشید. از آنجا که منابع تولید پراکنده اغلب توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌باشند، منظور از کنترل منابع تولید پراکنده، کنترل مبدل‌های متصل به آن‌ها می‌باشد. با کنترل بر روی نحوه کلید زنی این مبدل‌ها، که روش‌های گوناگونی برای این منظور وجود دارد، می‌توان به بهبود افت ولتاژ ناشی از خطا کمک کرد. یکی از روش‌های مورد استفاده برای کنترل این مبدل‌ها، روش PWM می‌باشد. در این پایان‌نامه با بهره‌گیری از این روش به کنترل مبدل‌های سمت شبکه و ژنراتور پرداخته و از این طریق به بهبود وضعیت ولتاژ در هنگام وقوع خطا می‌پردازیم.

نتایج این شبیه‌سازی به طور مفصل در فصل پنجم پایان‌نامه ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در این فصل با کنترل ولتاژ لینک DC و تزریق حداکثر توان، تحت شرایط مختلف، مبدل $B2B$ توان حداکثر را به شبکه تحویل می‌دهد. وجود مبدل اینورتری و تعیین نحوه سوئیچ زنی کلیدهای آن در هنگام خطای ولتاژ در نقطه PCC ، سبب بهبود ولتاژ می‌شود. این بهبود با تزریق جریان به شبکه از سمت منبع تولید پراکنده صورت می‌گیرد.

در ادامه در فصل دوم انواع سیستم‌های DG و عملکرد آن‌ها در حالت اتصال به شبکه مورد بررسی

قرار می‌گیرد. فصل سوم در رابطه با تأثیر DG بر پروفایل ولتاژ و کیفیت توان در شبکه می‌باشد. فصل چهارم روش‌های مختلف کنترل مبدل‌های ولتاژ مرجع الکترونیک قدرت در حالت اتصال به شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. فصل پنجم مدل‌سازی و نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود و فصل ششم نتیجه‌گیری کلی ارائه می‌گردد.

فصل دوم

معرفی تولیدات پراکنده

۲-۱ مقدمه

تولید پراکنده عموماً به منابع تولید انرژی الکتریکی در محل مصرف گفته می‌شود. با این وجود در حالت کلی به تکنولوژی‌هایی که از منابع تجدید پذیر برای تولید برق استفاده می‌کنند اطلاق می‌گردد. آنچه در مورد منابع تولید پراکنده که مستقیماً به شبکه توزیع وصل می‌شوند صدق می‌کند، این است که این مولدها صرف‌نظر از نحوه تولید توان نسبتاً کوچک بوده و معمولاً ظرفیتی کمتر از ۳۰۰ مگاوات دارند. بالا رفتن هزینه‌های توزیع و انتقال به مولدهای تولید پراکنده این امکان را می‌دهد که برق تولیدی خود را به قیمتی ارزان‌تر در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهند. در سیستم‌های تجدید ساختار شده در مناطقی که تولید انرژی دارای هزینه بالایی می‌باشد استفاده از *DG* توجیه اقتصادی دارد. علاوه بر این تولید پراکنده امکان استفاده از منابع پاک برای تولید برق را فراهم می‌نماید [۱-۳]. با توجه به کاربرد زیاد تولیدات پراکنده در دنیا، انتظار می‌رود بخش مهمی از سیستم‌های انرژی الکتریکی در آینده را به خود معطوف کنند. چنین سیستم‌هایی دارای مشخصه‌هایی هستند که با ظرفیت بالای تولید از طریق سوخت‌های فسیلی و سوخت هسته‌ای تفاوت دارند. وقتی سیستم‌های تولید پراکنده به صورت موازی با سیستم‌های توزیع کار می‌کنند، علاوه بر تزریق حداکثر توان تولیدی می‌توانند بسیاری از پارامترهای کیفیت توان را بهبود بخشد.

۲-۲ علل رویکرد به منابع تولید پراکنده در ایران

دلایل زیر از جمله عوامل رویکرد به تولید پراکنده در کشور ما می‌باشد.

۱- کاربرد واحدهای کوچک توسط مصرف‌کنندگان، صنعت برق را عملاً به تدریج خصوصی

می‌کند و این خصوصی‌سازی از اهداف دولت و وزارت نیرو می‌باشد

۲- نصب تولید پراکنده در پایدار نگه‌داشتن ولتاژ، اصلاح قدرت راکتیو، تزریق قدرت اکتیو، حفظ

فرکانس و نهایتاً بهبود کیفیت برق شبکه تأثیر مثبت دارد.

۳- نصب تولیدات پراکنده در محل‌های مصرف، جریان الکتریکی را در شبکه با توجه به قدرت

نصب‌شده کاهش می‌دهد. در نتیجه تعویض هادی‌ها، کابل‌ها و سایر تجهیزات را خصوصاً در شبکه توزیع کاهش می‌یابد.

۴- با توجه به نیاز ۲۰ سال آینده کشور به بیش از ۷۰ هزار مگاوات مصرف پیک و در نظر گرفتن ضریب ذخیره تولید بر مبنای گزارش مقدماتی صنعت برق ایران در سال ۱۴۰۰، نیاز به سرمایه‌گذاری بالای ۲۰ میلیارد دلار خواهد داشت. هرچه بتوان این سرمایه‌گذاری را از طریق *DG* توسط مصرف‌کنندگان تأمین کرد می‌توان از خروج ارز ناشی از فروش سرمایه‌های ملی جلوگیری کرده و نیز ایجاد اشتغال نمود.

۲-۳ تعریف منابع تولید پراکنده

منابع تولید پراکنده در مراجع، گزارش‌ها، نشریات و مقالات مختلف با اصطلاح‌های گوناگونی معرفی شده است که از جمله آن می‌توان به این موارد اشاره کرد [۱].

Embedded Generation

Dispersed Generation

Distributed Generation

Distributed Resources

ولی تاکنون تعریف جامع و کاملی برای تولیدات پراکنده ارائه نشده است و اگر هدف یافتن تعریف جامعی از این تولیدات باشد، باید عوامل و معیارهایی همچون هدف و مکان استفاده، مقادیر نامی، ناحیه تحویل توان، فن‌آوری، اثرات محیطی، روش بهره‌برداری، مالکیت و... منابع تولید پراکنده مشخص شود. [۳]

چند نمونه از تعریف‌هایی که در زمینه *DG* ارائه گردیده است.

۱- موسسه *The electric power institute* واژه *DG* را برای ژنراتورهایی با توان نامی بین چند

کیلووات تا ۵۰ مگاوات به کار می‌برد.

۲- موسسه *Gas research institute* واژه *DG* را برای ژنراتورهایی با توان نامی بین ۲۵ کیلووات تا ۲۵ مگاوات به کار می‌برد.

۳- *Preston and rastler* این توان نامی را بین چند کیلووات تا بیش از ۱۰۰ مگاوات می‌داند.

۴- *Cardell* واژه *DG* را برای ژنراتورهایی با توان نامی بین ۵۰۰ کیلووات تا ۱ مگاوات به کار می‌برد.

۵- *IEEE* تولید برق توسط وسایلی را که به اندازه کافی از نیروگاه‌های مرکزی کوچک‌تر بوده و قابل نصب در محل مصرف هستند را به عنوان تولید پراکنده معرفی کرده است.

۶- *IEA* واحدهای تولید پراکنده توان در محل مصرف یا در داخل شبکه توزیع که توان را به طور مستقیم به شبکه توزیع محلی تزریق می‌کنند را *DG* معرفی می‌کند.

۷- *CIGRE* تعریف زیر را برای منابع تولید پراکنده ارائه داده است:

- به صورت مرکزی برنامه‌ریزی نشده باشد.
- بهره‌برداری متمرکز نشده باشد.
- معمولاً به شبکه توزیع متصل شده باشد.
- بین ۵۰ کیلووات تا ۱۰۰ مگاوات باشد.

بنابراین *DG* را از جنبه‌های مختلفی می‌توان تعریف کرد [۲]:

۱- هدف (*purpose*)

۲- موقعیت (*location*)

۳- توان نامی (*rating of distributed generation*)

۴- ناحیه مورد تغذیه (*power delivery area*)

۵- تکنولوژی ساخت (technology)

۱- هدف (purpose)

از لحاظ هدف می‌توان گفت تقریباً بین تمامی مؤلفین و موسسه‌ها اجماع نظر وجود دارد. هدف از تولید پراکنده فراهم آوردن توان اکتیو می‌باشد. یعنی طبق این تعریف نیازی نیست که حتماً DG بتواند توان راکتیو نیز تولید کند.

۲- موقعیت (location)

از لحاظ موقعیت نصب بین مؤلفین اختلاف نظر وجود دارد. بسیاری از مؤلفین مکان نصب DG را در ناحیه شبکه توزیع می‌دانند. بعضی از مؤلفین مکان آن را در سمت مشترکین (بعد از کنتور) می‌دانند و عده کمی مکان نصب آن را در ناحیه انتقال می‌دانند.

۳- توان نامی (rating of distributed generation)

ماکزیمم توان نامی DG که به سیستم‌های توزیع متصل می‌گردند بستگی به ظرفیت سیستم توزیع، مشخصات نامی تجهیزات و طراحی خط دارد. مثلاً DG هایی با قدرت بالاتر از ۱۵۰-۱۰۰ مگاوات را به دلیل محدودیت‌های تکنیکی نمی‌توان به خطوط ولتاژی ۱۱۰ کیلوولت وصل کرد. بنابراین از لحاظ ماکزیمم توان نامی نمی‌توان تعریف واحدی ارائه نمود اما می‌توان آن‌ها را بر اساس ظرفیت نامی به چند گروه دسته‌بندی کرد.

<i>Micro distributed generation</i>	<i>1 watt-5 KW</i>
<i>Small distributed generation</i>	<i>5KW-5MW</i>
<i>Medium distributed generation</i>	<i>5MW-50 MW</i>
<i>Large distributed generation</i>	<i>50MW-300MW</i>

۴- ناحیه مورد تغذیه (power delivery area)

در این مورد هم مانند موارد قبل تعریف واحدی از ناحیه مورد تغذیه DG وجود ندارد. بعضی از

مؤلفین ناحیه مورد تغذیه DG را فقط شبکه توزیع می‌دانند. اما مثلاً در نیوزلند یک مزرعه بادی با توان ۳,۵ مگاوات وجود دارد که هنگام روز کل انرژی تولیدی به شبکه توزیع تزریق می‌گردد. اما در هنگام شب که تقاضا بسیار پایین است و سرعت باد خیلی بالاست بیشتر انرژی به شبکه انتقال صادر می‌شود. بنابراین اگر ناحیه تغذیه DG را فقط شبکه توزیع بدانیم مزرعه بادی ذکر شده را نمی‌توان DG به حساب آورد. بنابراین به نظر می‌رسد محدود کردن ناحیه تغذیه DG به شبکه توزیع چندان مناسب نباشد.

۵- تکنولوژی ساخت (*technology*)

فناوری‌های زیادی برای تولید پراکنده ارائه گردیده است. توان تولیدی آن‌ها بسته به کاربرد آن‌ها از چند میلی وات تا چند مگاوات می‌باشد. تعدادی از این فناوری‌ها در زیر آمده است. [۷ و ۸]

سیستم‌های فتو ولتاییک

سیستم‌های تبدیل انرژی بادی به الکتریکی

نیروگاه‌های زمین گرمایی

سیستم‌های تبدیل انرژی موجی و جزر و مد به الکتریکی

پیل‌های سوختی

استفاده و بازیافت توده‌های زیست‌محیطی (بیوماس)

ترمو الکتریک

ترمیونیک

نیروگاه‌های تولید همزمان برق و گرما (CHP)

در مورد تکنولوژی ساخت DG ها چند نکته را می‌توان ذکر کرد. اول این که در بسیاری از این تکنولوژی‌ها از انرژی تجدیدپذیر استفاده شده است. بر اساس تعریف IEA ^۱ انرژی‌های تجدیدپذیر

^۱ international energy agency

انرژی‌هایی هستند که در معرض تخلیه و پایان‌پذیری قرار ندارند. مثلاً انرژی گرمایی و نورانی حاصل از نور خورشید، انرژی باد، انرژی حاصل از آبشارها، انرژی حاصل از اقیانوس‌ها و انرژی گرمایی درون زمین. انرژی‌هایی که به سطح زمین می‌رسند ۱۰۰۰ برابر بیشتر از انرژی به دست آمده از سوخت‌های فسیلی در حال حاضر می‌باشد. ولی میزان دسترسی به منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورها و مناطق مختلف متفاوت خواهد بود. همچنین با توجه به تکنولوژی‌های به‌کاررفته راندمان DG ها در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر متفاوت می‌باشد. نکته دوم این که تکنولوژی‌هایی همچون میکرو توربین‌ها، سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، موتورهای دیزلی، پیل‌های سوختی و باتری‌ها شامل واحدهای کوچک از پیش‌ساخته شده‌ای می‌باشد، که در کارخانه‌ها ساخته شده‌اند و به راحتی در کمترین زمان ممکن در محل مورد نیاز نصب می‌گردند. بنابراین با توجه به تکنولوژی ساخت، ساختن و راه‌اندازی DG به زمان بسیار کمتری نسبت به ساخت نیروگاه‌های متمرکز عظیم دارد. نکته دیگر درباره تکنولوژی ساخت DG می‌توان به تکنولوژی‌های CHP ^۱ اشاره کرد. توربین‌های سیکل ترکیبی، موتورهای احتراق داخلی و انرژی گرمایی درون زمین سیستم‌هایی هستند که از تکنولوژی‌های CHP استفاده می‌کنند. مزیت اساسی این تکنولوژی‌ها این است که استفاده همزمان از گرما و انرژی الکتریکی راندمان سیستم را افزایش می‌دهد. بنابراین از لحاظ تکنولوژی‌های ساخت DG ها را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد.

Renewable distributed generation

Modular distributed generation

CHP distributed generation

استفاده از مولدهای DG در سیستم توزیع منافی را برای شرکت‌های تولیدکننده، مصرف‌کنندگان برق و به طور کلی جامعه به همراه دارد. کاهش تلفات خطوط، بهبود پروفایل ولتاژ، کاهش انتشار گازهای آلاینده، ارتقاء امنیت و اطمینان شبکه، بهبود کیفیت توان، آزادسازی ظرفیت

^۱ combined heat and power

سیستم‌های توزیع و انتقال، به تعویق افتادن سرمایه‌گذاری برای توسعه شبکه، ارتقاء بهره‌وری و افزایش امنیت برای بارهای حساس و پراهمیت شبکه‌های توزیع از نتایج مثبت به‌کارگیری DG برای تولیدکنندگان و متصدیان شبکه است. مصرف‌کنندگان انرژی هم با دریافت توان مطلوب باکیفیت بالا و اطمینان بیشتر اما هزینه پایین‌تر و با اثرات مخرب کمتر از این تکنولوژی سود می‌برند. همچنین ارتقاء سلامت محیط زیست افزایش بهره‌وری در سیستم و بهره‌برداری مفید و پربازده از منابع انرژی، منافع هستند که شامل حال جامعه و مردم می‌شوند.

۲-۴ برخی از انواع تولیدات پراکنده و نحوه اتصال آن‌ها به شبکه

۲-۴-۱ توربین‌های بادی

توربین‌های بادی انرژی جنبشی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. توربین‌های بادی متصل به شبکه به دو دسته توربین‌های با سرعت ثابت و توربین‌های با سرعت متغیر تقسیم می‌شوند. توربین‌های بادی با سرعت ثابت عموماً از ژنراتورهای القایی قفسه سنجابی استفاده می‌کنند که مستقیم و بدون هیچ واسطی به شبکه وصل می‌شوند. توربین‌های بادی با سرعت متغیر به یک ژنراتور القایی از دو سو تغذیه یا یک ژنراتور سنکرون وصل می‌شوند. در حالت اول توان روتور (در فرکانس لغزشی) از طریق حلقه‌های لغزشی جمع می‌شود. چون فرکانس و ولتاژ این توان تولیدی با شبکه سازگار نیست. لذا از یک یکسو کننده و یک اینورتر به عنوان واسط با شبکه استفاده می‌شود. در حالت دوم توربین بادی به یک ژنراتور سنکرون یا مغناطیس دائم متصل می‌شود. در این حالت نیز فرکانس و ولتاژ خروجی ژنراتور با سرعت باد تغییر می‌کند و لذا از یک یکسو کننده و اینورتر به عنوان واسط با شبکه استفاده می‌شود تا توان خروجی با شبکه سازگار شود.

۲-۴-۲ فتوولتایی

سیستم‌های فتوولتایی انرژی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. توان تولیدی سیستم‌های فتوولتایی از نوع DC است که برای اتصال به شبکه با استفاده از اینورتر به AC

تبدیل می‌شود. از مزایای این نوع نیروگاه‌ها می‌توان به ثبات عملکرد، هزینه تعمیرات کم، نداشتن قطعات متحرک، بی‌صدایی و عملکرد ساده، عمر نامحدود به شرط مراقبت سالم، بی‌نیاز از سوخت و نداشتن کمترین اثرات نامطلوب بر روی محیط زیست اشاره کرد. از معایب آن می‌توان نیاز به داشتن منطقه وسیع جهت جمع‌کننده‌های (کلکتور) انرژی تابشی و متغییر بودن توان خروجی در فصول مختلف سال نام برد.

۲-۴-۳ پیل سوختی

پیل سوختی وسیله‌ای است که انرژی شیمیایی ذخیره‌شده در سوخت را از طریق فرآیندهای الکتروشیمیایی به طور مستقیم و بدون نیاز به توربین و ژنراتور و بدون احتراق و ایجاد آلودگی به انرژی الکتریکی و حرارتی تبدیل می‌کند. برق تولیدی پیل سوختی از نوع DC است که توسط یک اینورتر به برق AC سازگار با شبکه تبدیل و به شبکه تزریق می‌شود.

۲-۴-۴ نیروگاه‌های بیوماس

بیوماس نوعی ماده آلی است که به وسیله گیاهان و مشتقات آن‌ها تولید می‌گردد. برخلاف زغال‌سنگ، نفت و گاز که در طی میلیون‌ها سال به وجود می‌آیند، بیوماس را می‌توان منبع تجدیدپذیر تلقی کرد. زیرا عمر گیاه تجدید می‌شود. بیوماس را می‌توان شکلی از انرژی خورشید تصور کرد چون که در واقع این انرژی در نتیجه فتوسنتز گیاهان حاصل می‌شود. انواع مختلف بیوماس علاوه بر پسماندهای چوبی و تفاله‌های گیاهی به گونه‌ای هستند که حجم زیادی را اشغال کرده و محتوای مقدار زیادی آب هستند. بنابراین انتقال آن‌ها به مسافت‌های دور مقرون به صرفه نمی‌باشد. با وجود این بیوماس را می‌توان به سوخت‌های گازی یا مایع تبدیل کرد که بدین وسیله چگالی آن افزایش می‌یابد و انتقال آن مقرون به صرفه می‌گردد.

منابع بیوماس از طریق احتراق مستقیم یا تبدیل به سوخت‌های گازی و مایع قابل استفاده برای تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های موتور احتراقی، توربین‌های گازی، نیروگاه‌های بخار سیکل

ترکیبی و پیل سوختی می‌باشند. نیروگاه‌های بخار بسته به نوع نیروگاه می‌توانند از بیوماس جامد یا سوخت‌های مایع و گازی حاصل از بیوماس استفاده کنند. موتورهای احتراقی و توربین‌های گازی از سوخت‌های مایع یا گاز حاصل از بیوماس استفاده می‌کنند.

الف) موتورهای احتراق داخلی: این واحدها با مصرف سوخت فسیلی یا سوخت‌های مایع و گاز حاصل از بیوماس انرژی شیمیایی (یا حرارتی) را با حرکت دادن پیستون‌ها به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. سپس پیستون‌ها شفتی را می‌چرخانند و انرژی مکانیکی را از طریق یک ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. ژنراتور الکتریکی عموماً از نوع سنکرون یا القایی است و بدون هیچ واسطی مستقیماً به شبکه وصل می‌شود.

ب) توربین‌های گازی: این واحدها مشابه موتورهای احتراق داخلی سوخت فسیلی یا سوخت‌های مایع و گاز حاصل از بیوماس را با هوا ترکیب و انرژی گرمایی تولید می‌کنند. هوای فشرده با دمای بالا عامل انتقال حرارت بوده که در توربین منبسط می‌شود و انرژی حرارتی را به انرژی مکانیکی تبدیل نموده و شفتی را می‌چرخاند. شفت متصل به مجموعه‌ای از چرخ‌دنده‌ها است که یک ژنراتور سنکرون را می‌چرخانند. این ژنراتور سنکرون مستقیماً و بدون هیچ واسطی به شبکه متصل می‌باشد.

۲-۴-۵ میکروتوربین‌ها

اصول عملکرد این واحدها بسیار نزدیک به نوع توربین گازی می‌باشد با این تفاوت که یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در سرعت بالا می‌چرخد و برق را در فرکانس بالا تولید می‌کند. لذا این ژنراتور نمی‌تواند مستقیماً به شبکه وصل شود. به همین خاطر برق تولیدی آن ابتدا به DC تبدیل و سپس توسط یک اینورتر به برق AC سازگار با شبکه تبدیل می‌شود. مزایای اصلی میکرو توربین‌ها آلودگی صوتی کم، ابعاد کوچک، تعداد بخش‌ها متحرک کم و قابلیت استفاده از سوخت‌های زائد و بی‌مصرف می‌باشد. میکرو توربین‌های کوچک در محدوده ۲۵ الی ۱۰۰ کیلووات بوده و سرعت

آن‌ها تقریباً ۵۰۰۰ تا ۹۰۰۰۰ دور بر دقیقه و ولتاژ خروجی آن حدود ۵۰۰ ولت می‌باشد. هنگامی که یک پروسه (CHP) به این سیستم‌ها اعمال گردد راندمان آن‌ها می‌تواند تا ۸۵ درصد برسد.

۲-۵ اهداف استفاده از تولید پراکنده

اگر مالکیت DG در اختیار شرکت توزیع باشد اهداف مورد نظر آن می‌تواند آزادسازی ظرفیت شبکه توزیع، بهبود قابلیت اطمینان سیستم، تولید همزمان برق و حرارت، بهبود کیفیت توان و پروفایل ولتاژ و کاهش تلفات باشد.

اگر مالکیت DG در اختیار مشترک باشد این اهداف می‌تواند فروش برق و شرکت در بازار انرژی، بهبود قابلیت اطمینان خود، تشویق‌های دریافتی از شرکت توزیع و ... باشد.

با توجه به اینکه مالکیت بیشتر تولیدات پراکنده در اختیار مشترکین می‌باشد شرکت‌های توزیع کنترل کمتری روی اندازه و محل نصب تولیدات پراکنده دارند. بنابراین برای جلوگیری از تأثیرات منفی آن‌ها بر پارامترهای مختلف شبکه باید یک استاندارد کلی و جامع برای کنترل، نصب و جابجایی این تولیدات وجود داشته باشد. به طور کلی هدف از استفاده از منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، تأمین تمام یا قسمتی از توان مصرفی شبکه به صورت تمام وقت یا پاره‌وقت می‌باشد که در این میان هدف اصلی توان اکتیو می‌باشد [۱].

مزایای استفاده از DG از دید شبکه توزیع:

۱- جلوگیری از افزایش ظرفیت شبکه

تولیدات پراکنده به عنوان یک منبع کمکی می‌تواند نیاز شبکه به انرژی بیشتر را تأمین نماید و در نتیجه نیاز به احداث خطوط جدید را به تعویق بیاورد.

۲- کاهش تلفات

با نصب DG در محل مصرف‌کننده انتقال انرژی به مصرف‌کننده مسیر کوتاه‌تری را طی کرده و مقاومت کمتری در مسیر انتقال انرژی از منبع به مصرف‌کننده قرارگرفته در نتیجه تلفات کاهش می‌یابد.

۳- تأمین توان راکتیو

بعضی از DG ها علاوه بر توان اکتیو، توان راکتیو نیز تولید می کنند که این امر موجب پایداری شبکه می گردد.

۴- پیک سایی

استفاده از DG در ساعات اوج مصرف می تواند میزان تقاضا از شبکه را کاهش داده که این امر کاهش هزینه های اقتصادی را در بر دارد.

۵- بهبود کیفیت توان

با نصب DG اثرات منفی کیفیت توان از جمله ولتاژ و فرکانس نامطلوب در شبکه کاهش می یابد.

مزایای استفاده از DG از دید مشترکین:

۱- کاهش هزینه های خرید انرژی

در روش تولید همزمان گرما و انرژی، (CHP) می توان بخار یا آب گرم مورد نیاز فرایندهای مختلف را تأمین کرده یا در مواردی که نیاز به گرم کردن محیط می باشد از گرما استفاده کرده و راندمان سیستم را افزایش داده و هزینه های خرید انرژی کاهش می یابد.

۲- افزایش قابلیت اطمینان

تولیدات پراکنده می تواند به عنوان منبع پشتیبان در زمان قطعی برق شبکه مانع خاموشی های مشترکین گردد.

۳- منبع جدید درآمد

تولیدات پراکنده این امکان را به مشترکین می دهد که بتوانند انرژی تولیدی خود را به فروش برسانند و یک منبع درآمد جدیدی داشته باشند. [۴]

۲-۶ معایب استفاده از DG

علاوه بر تمام مزایایی که به کارگیری DG در شبکه دارد، ورود DG به شبکه باعث به وجود

آمدن مشکلاتی نیز می‌گردد که مهم‌ترین این مشکلات مربوط به مسئله سطح ولتاژ و حفاظت می‌باشد. ورود DG ها باعث پیچیده شدن شبکه و سیستم حفاظتی آن می‌گردد و کنترل شبکه مشکل تر می‌گردد. اتصال DG ها به شبکه باعث افزایش هارمونیک شبکه می‌گردد [۵].

با اتصال DG به شبکه بعضی از ویژگی‌های شبکه دست‌خوش تغییرات می‌گردد برای مثال: مقدار نامی تجهیزات و سطح اتصال کوتاه، افزایش ولتاژ، تلفات، کیفیت توان، قابلیت اطمینان سیستم و سیستم‌های حفاظتی

- مقدار نامی تجهیزات و سطح اتصال کوتاه:

با افزایش DG ها سطح اتصال کوتاه شبکه افزایش می‌یابد و باید مراقب بود که این سطح اتصال کوتاه از قدرت نامی کلیدهای قدرت تجاوز نکند که در این صورت شبکه را با خطر روبرو خواهد ساخت.

- افزایش ولتاژ:

وقتی DG به شبکه وصل می‌شود شارش توان اکتیو و راکتیو خطوط دست‌خوش تغییرات می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که وجود DG باعث افزایش چشمگیری در ولتاژ انتهای خطوط بلند با امپدانس خط بالا در حالت بار سبک می‌گردد.

- تلفات:

تلفات یکی از مسایل مهمی است که در هنگام طراحی و پیاده‌سازی سیستم باید آن را مد نظر قرارداد. تلفات جز جدایی‌ناپذیر هر سیستم هستند. اما مقدار آن با توجه به طراحی سیستم متغیر می‌باشد. با ورود DG ها بهره‌برداری از شبکه با تغییرات مختلفی روبرو می‌شود. شارش توان دو طرفه می‌گردد. تلفات بسیار وابسته به مقدار توان عبوری از خط هستند. بنابراین ورود DG ها تأثیرات چشمگیری در تلفات خط خواهد داشت.

- کیفیت توان:

تولیدات پراکنده‌ها تأثیرات قابل توجهی در کیفیت توان سیستم‌های توزیع دارند. بسیاری از DG ها از ادوات الکترونیک قدرت در فصل مشترک خود با شبکه استفاده می‌کنند که این ادوات تولید هارمونیک می‌کنند و این مسئله را هنگام طراحی باید مد نظر قرارداد. چون غفلت از این موضوع ممکن است باعث به وجود آمدن رزونانس در خازن‌ها یا کابل‌ها گردد.

- قابلیت اطمینان :

قابلیت اطمینان همواره از مهم‌ترین مسایل هر سیستمی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین بحث‌های هر سیستم، بحث قابلیت اطمینان آن می‌شود. با ورود DG ها روش‌هایی که برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان سیستم‌ها استفاده می‌شد نیز دست‌خوش تغییرات گردید. مثلاً حالت‌های مختلف پدیده جزیره‌ای شدن نیز باید در این روش مد نظر قرارداد درحالی‌که قبلاً چنین چیزی وجود نداشت.

- حفاظت:

بیشتر تجهیزات حفاظتی که در سیستم‌های قدرت وجود دارد بر مبنای شارش توان یک سویه از سمت نیروگاه‌ها به سمت بارها طراحی شده‌اند. اما همان‌گونه که قبلاً اشاره شد با ورود DG این شارش‌ها به صورت دو طرفه گردید که این امر باعث به وجود آمدن مشکلات در عملکرد سیستم‌های حفاظتی می‌شود که باید طراحی جدیدی در سیستم‌های حفاظتی گنجانده شود.

۷-۲ مقایسه کلی انواع تکنولوژی‌ها

به دلیل گسترده بودن فناوری‌های بکار گرفته‌شده، نمی‌توان از آن‌ها در تعریف کلی استفاده کرد. جدول (۱-۲) نشان‌دهنده تنوع فناوری‌های موجود برای تولید پراکنده می‌باشد [۶۵].

جدول (۲-۱) انواع فناوری‌های به‌کاررفته در تولید پراکنده [۵۶]

فن آوری	اندازه مرسوم برای هر نوع
توربین گازی سیکل ترکیبی	۳۵ تا ۴۰ مگاوات
موتورهای احتراق داخلی	۵ کیلووات تا ۱۰ مگاوات
توربین‌های احتراقی	۱ تا ۲۵ مگاوات
میکرو توربین‌ها	۳۵ کیلو تا ۱ مگاوات
آبی کوچک (<i>small hydro</i>)	۱ تا ۱۰۰ مگاوات
آبی خیلی کوچک (<i>micro hydro</i>)	۲۵ کیلو تا ۱ مگاوات
توربین بادی	۲۰۰ وات تا ۳ مگاوات
سلول خورشیدی (<i>PV</i>)	۱۰ کیلووات تا ۲۰ مگاوات
بیوماس	۱۰۰ کیلووات تا ۲۰ مگاوات
پیل سوختی (<i>PFC (Phosacid)</i>)	۲۰۰ کیلووات تا ۲ مگاوات
پیل سوختی (<i>MC (Molten Carbonate)</i>)	۲۵۰ کیلووات تا ۲ مگاوات
پیل سوختی (<i>PEM (Proton Exchange Membrane)</i>)	۱ کیلو تا ۲۵۰ کیلووات
پیل سوختی (<i>SO (Solid Oxide)</i>)	۲۵۰ کیلووات تا ۵ مگاوات
زمین گرمایی	۱ مگا تا ۵ مگاوات
انرژی موج	۱۰۰ کیلووات تا ۱ مگاوات
موتور چرخ لنگر (چرخ‌های گردان)	۲ کیلو تا ۱۰ کیلووات
باتری انباره‌ای	۵۰۰ کیلووات تا ۵ مگاوات

۲-۸) مقایسه انواع فناوری‌ها

مشخصات انواع فناوری‌های مختلف تولید پراکنده و توانایی‌های آن‌ها در جداول (۲-۲) و (۲-۳)

آمده است.

جدول (۲-۲) مشخصات انواع فناوری‌های مختلف تولید پراکنده [۵].

ویژگی	دیزل ژنراتور	توربین گازی	میکرو توربین	PV	توربین بادی	پیل‌های سوختی
قابلیت دیسپاچینگ	بله	بله	بله	-	-	بله
سوخت	گاز یا دیزل	گاز	انواع سوخت‌های مایع	خورشید	باد	گاز
بازده (%)	۳۵	۲۹-۴۲	۲۷-۳۲	۶-۱۹	۲۵	۴۰-۵۷
چگالی انرژی بر واحد سطح	۵۰	۵۹	۵۹	۰,۰۲	۰,۰۱	۱-۳
آیا احتیاجی به ذخیره انرژی است؟	خیر	خیر	خیر	بله	بله	خیر
واحد انتشار <i>NOX</i> گاز	۰,۳ ۳,۷	۰,۰۱ ۰,۱۷	۰,۰۱ ۰,۱۷	-	-	۰,۰۰۳
طول عمر کاری	۴۰۰۰ .	۴۰۰۰	۴۰۰۰	-	-	۱۰۰۰-۴۰۰۰

جدول (۲-۳) توانایی‌های انواع فناوری‌ها [۵]

سوخت ارزان	انرژی سبز	کاربرد در <i>CHP</i>	بهبود کیفیت توان	بهبود قابلیت اطمینان	پیک زدایی	
خیر - بجز سوخت بیوماس	خیر بجز سوخت بیوماس	بله	بسته به مورد	بله - با دیسپاچینگ	بله	موتور احتراق معکوس
خیر - بجز سوخت بیوماس	خیر بجز سوخت بیوماس	بله	بسته به مورد	بله - با دیسپاچینگ	بله	توربین گازی
خیر - بجز سوخت بیوماس	خیر بجز سوخت بیوماس	بله	بسته به مورد	بله - با دیسپاچینگ	بله	میکرو توربین
خیر	خیر - بجز تولید هیدروژن با انرژی باد و خورشید	بله	بسته به مورد	بله - با دیسپاچینگ	بله	پیل سوختی
بله	بله	-	بسته به مورد	-	-	<i>PV</i>
بله	بله	-	بسته به مورد	-	-	توربین بادی
بله	بله	-	بسته به مورد	بجز برق آبی	-	دیگر انواع ژنراتور

فصل سوم

تأثیر DG بر پرو فایل ولتاژ و

تلفات

۳-۱ مقدمه

یکی از مشکلات قابل توجه در شبکه‌های توزیع، مسئله نامناسب بودن پروفایل ولتاژ می‌باشد. تأثیر واحدهای تولید پراکنده بر روی تنظیم ولتاژ می‌تواند مثبت و یا منفی باشد و این امر بستگی به سیستم توزیع، مشخصات واحدهای تولید پراکنده و نیز مکان نصب آن‌ها دارد. از آن جایی که ولتاژ یکی از مهم‌ترین معیارها از نقطه نظر کیفیت توان در ارائه خدمات توسط شرکت‌های برق می‌باشد، بنابراین در سال‌های اخیر با حضور واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، توجه زیادی به بررسی اثر این واحدها بر روی ولتاژ صورت گرفته است.

۳-۲ شاخص بهبود پروفایل ولتاژ

یکی از اهداف جانبی بهره‌برداری از واحدهای DG در شبکه توزیع بهبود پروفایل ولتاژ شبکه و حفظ ولتاژ ترمینال مصرف‌کننده با قابلیت اطمینان بالاتر در محدوده‌ی مطلوب و استاندارد است. شارش جریان الکتریسیته در خطوط باعث افت ولتاژ می‌شود و سیستم تولید پراکنده با تزریق توان به شبکه و تأمین بخشی از توان اکتیو و راکتیو مصرف‌کننده جریان جاری در خطوط را کاهش می‌دهد که باعث اصلاح ولتاژ شبکه و بهبود توان دریافتی می‌شود. شاخص بهبود پروفایل ولتاژ $VPPI^1$ تأثیر DG بر ولتاژ را نشان می‌دهد و با معادله (۳-۱) تعریف می‌شود [۹].

$$VPPI = \frac{VP_{w/DG}}{VP_{wo/DG}} \quad (۳-۱)$$

$VP_{w/DG}$ و $VP_{wo/DG}$ به ترتیب پروفایل ولتاژ با DG و بدون DG می‌باشد. پروفایل ولتاژ با معادله (۳-۲) بیان می‌شود.

$$VP = \sum_{i=1}^N V_i L_i K_i \quad (۳-۲)$$

که V_i اندازه‌ی ولتاژ بر حسب پریونیت، L_i بار، بر حسب پریونیت و K_i فاکتور وزن دهی

¹ voltage profile improvement index

در باس i آم هستند و N تعداد کل شین‌های سیستم توزیع می‌باشد. بنا بر روابط بالا سه حالت زیر هر یک معنای مشخصی خواهند داشت.

$VP_{II} < 1$: DG در ولتاژ شبکه اثر منفی داشته است.

$VP_{II}=1$: DG موثر واقع نشده است.

$VP_{II} > 1$: DG در ولتاژ شبکه اثر مثبت داشته است.

در واقع واحدهای تولید پراکنده را در هر نقطه‌ای از شبکه توزیع می‌توان نصب و بهره‌برداری کرد و شاخص VP_{II} می‌تواند بهترین مکان را نشان دهد. به این نحو که بالاترین مقدار VP_{II} در بهترین گزینه نصب (باهدف بهبود پروفایل ولتاژ) دیده می‌شود.

۳-۳ تأمین توان راکتیو

اگر به جای تأمین توان راکتیو از نیروگاه مرکزی آن را در محل مورد نیاز توسط منابع توان راکتیو تأمین کنیم، راندمان خطوط انتقال و توزیع به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. چون تأمین توان راکتیو از نیروگاه به سمت بار، بخشی از ظرفیت خط را اشغال می‌کند. در صورتی که اگر توان راکتیو مورد نیاز را در محل مصرف تأمین نماییم ظرفیت خط آزاد شده و توان اکتیو بیشتری را می‌توان توسط خط انتقال داد. در نتیجه راندمان افزایش می‌یابد. منابع تولید توان راکتیو معمولاً به دو دسته دینامیک و استاتیک تقسیم‌بندی می‌گردند.

منابع دینامیک شامل ژنراتورها و جبران‌کننده‌های دینامیک توان راکتیو می‌باشند. منابع استاتیک شامل کندانسورهای سنکرون، بانک‌های خازنی و جبران‌کننده‌های استاتیک توان راکتیو می‌باشند. معمولاً جبران‌کننده‌های دینامیک به جبران‌کننده‌های استاتیک ترجیح داده می‌شوند. چون جبران‌کننده‌های دینامیک پاسخ سریع‌تری به تغییرات توان راکتیو می‌دهند درحالی‌که جبران‌کننده‌های استاتیک قادر به پاسخگویی سریع نسبت به تغییرات توان راکتیو نیستند. در جدول ۳-۱ مزایا و معایب انواع جبران سازها آورده شده است.

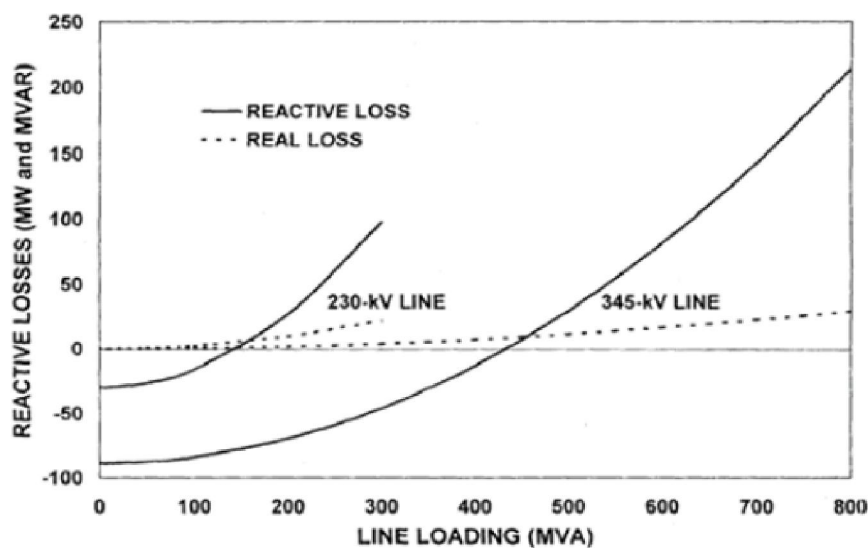
جدول ۳-۱. انواع جبران‌کننده‌ها و مزایا و معایب آن‌ها [۸]

جبران‌کننده	مزایا	معایب
خازن موازی	سادگی از نظر اصول کار و ساختمان	سوییچ کردن همراه با حالت گذرا است.
کندانسور سنکرون	توانایی تحمل اضافه‌بار را دارد قابل کنترل کامل است هارمونیک کم تولید می‌کند	نیاز به نگهداری زیادی دارد پاسخ آن کند است رفتار آن نسبت به محل قرار گرفتنش حساس است نیاز به فنداسیون محکمی دارد
راکتور کنترل شونده با تریستور (TCR)	پاسخ آن سریع است قابل کنترل کامل است	تولید هارمونیک می‌کند رفتار آن نسبت به محل قرار گرفتنش حساس است
خازن سوییچ شونده با تریستور (TSC)	وقتی خراب می‌شود به سرعت قابل تعمیر است تولید هارمونیک نمی‌کند	کنترل آن پیچیده است پاسخ فرکانس آن کند است رفتار آن نسبت به محل قرار گرفتنش حساس است
DG	می‌تواند توان اکتیو و راکتیو را باهم کنترل کند توانایی جبران کامل ولتاژ به همراه کاهش تلفات را دارد	انجام جایی دقیق آن در طول شبانه‌روز کار مشکلی می‌باشد

بیشتر تلفات سیستم مربوط به تلفات بخش توزیع می‌باشد (حدود ۲۷٪) [۹]. وقتی از DG برای تأمین توان راکتیو استفاده کنیم تلفات فیدرهای توزیع به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد و کیفیت توان بخش‌های مربوط به آن فیدر نیز بهبود می‌یابد.

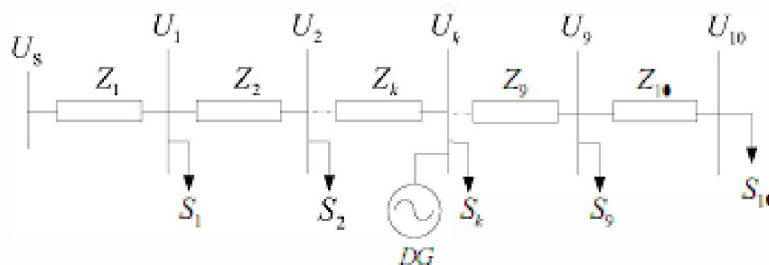
شکل (۳-۱) رفتار خط انتقال را در ارتباط با توان راکتیو نشان می‌دهد. زمانی که توانی که از خط عبور می‌کند کم باشد (شرایط بار سبک) خط توان راکتیو تولید می‌کند ولی زمانی که توان عبوری از خط به مقدار نامی خط نزدیک می‌گردد (شرایط بار سنگین) خط به طور چشمگیری توان راکتیو مصرف می‌کند. در چنین شرایطی برای اینکه ولتاژ خط در حد مطلوب نگه داشته شود باید

توان راکتیو زیادی از طرف نیروگاه یا هر منبع دیگر برای خط انتقال تأمین گردد. در نتیجه تلفات راکتیو خط افزایش می‌یابد و بخش زیادی از ظرفیت خط را اشغال می‌کند. ولتاژ خط شدیداً متأثر از ضریب قدرت خط (مقدار توان اکتیو و راکتیو) می‌باشد. ضریب قدرت خط را می‌توان با نصب، برداشتن و یا تنظیم منابع تولید توان راکتیو تصحیح کرد.



شکل ۱-۳ رفتار خط انتقال در ارتباط با توان راکتیو [۶]

با جایابی و مقدار یابی بهینه منابع تولید پراکنده می‌توان پروفیل ولتاژ را در سیستم‌های توزیع بهبود داد. در شبیه‌سازی مرجع [۶] این امر نشان داده شده است. در سیستم توزیع شکل (۲-۳) با نصب DG با اندازه بهینه و در مکان بهینه پروفیل ولتاژ در سیستم بهبود یافته است.



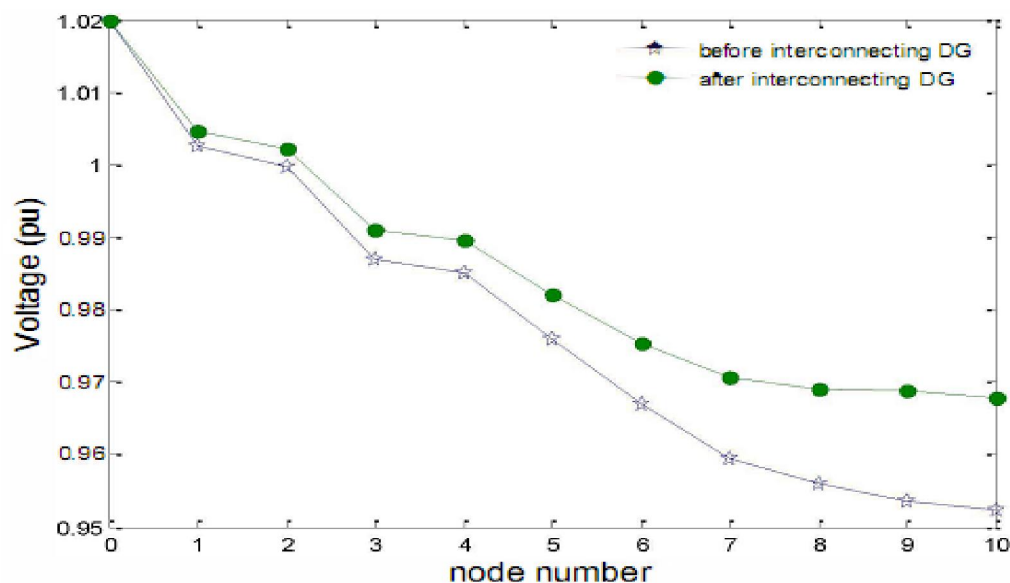
شکل ۲-۳. یک فیدر نمونه [۶]

اطلاعات خط و بار هر باس در جدول (۳-۲) آمده است.

جدول ۳-۲. اطلاعات فیدر توزیع نمونه [۶]

Node number	impedance	Active power	Reactive power
1	0.0084+j0.0251	0.0531	0.0326
2	0.0015+j0.0044	0.0948	0.0165
3	0.0021+j0.0253	0.0761	0.0677
4	0.0012+j0.0036	0.0634	0.0687
5	0.0075+j0.0227	0.0164	0.0716
6	0.0092+j0.0275	0.0312	0.0965
7	0.0114+j0.0342	0.0218	0.0684
8	0.0087+j0.0259	0.0254	0.0446
9	0.0098+j0.0296	0.0718	0.0230
10	0.0111+j0.0335	0.0423	0.0171
DG		0.0677	0.0505

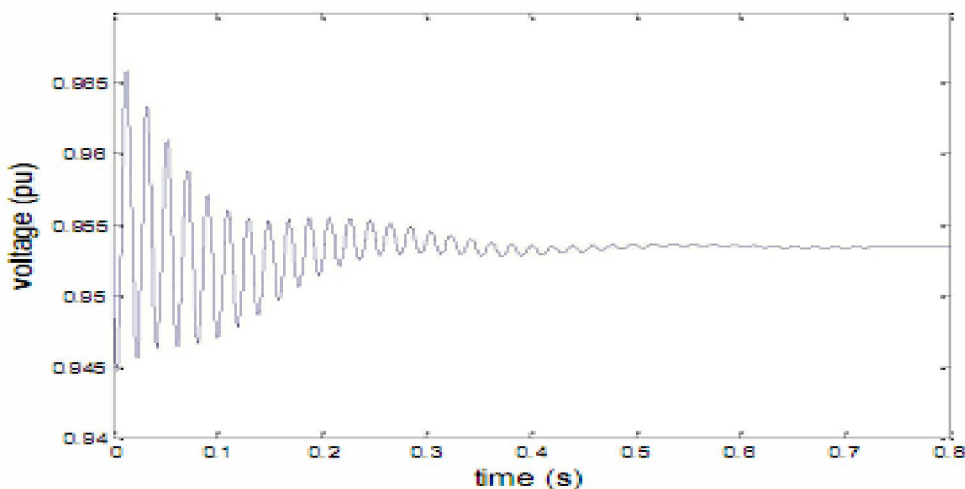
باس بهینه برای نصب DG در این سیستم باس شماره ۹ می‌باشد که با استفاده از الگوریتم‌های مربوطه این باس و مقدار بهینه DG به دست آمده است و پروفایل ولتاژ قبل و بعد از نصب DG در شکل زیر آمده است که به وضوح مشخص است که پروفایل ولتاژ به طور چشمگیری بهبود یافته است.



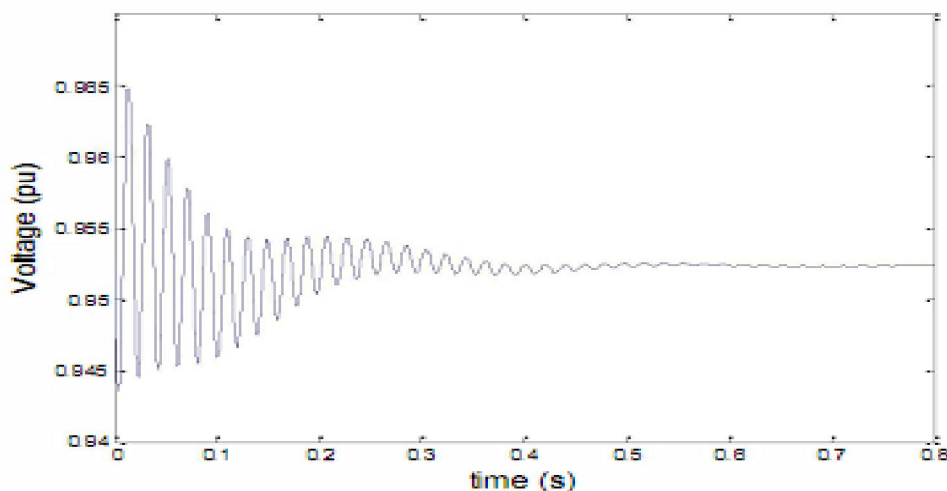
شکل ۳-۳ ولتاژ قبل و بعد از اتصال DG به شبکه [۶]

۳-۴. ولتاژ گذرا در هنگام اتصال DG به شبکه

در لحظه ابتدایی اتصال DG به شبکه، اغتشاشاتی در سیستم به وجود می‌آید. در سیستم بالا با اتصال DG به باس‌های شماره ۱ و ۵ و ۹ تأثیر آن در حالت گذرا که در ولتاژ باس انتهایی به وجود می‌آید شبیه‌سازی گردیده است. ولتاژ حالت گذرای باس‌های ۹ و ۱۰ وقتی DG به باس شماره ۹ متصل می‌گردد، مطابق شکل (۳-۴) و (۳-۵) می‌باشند.



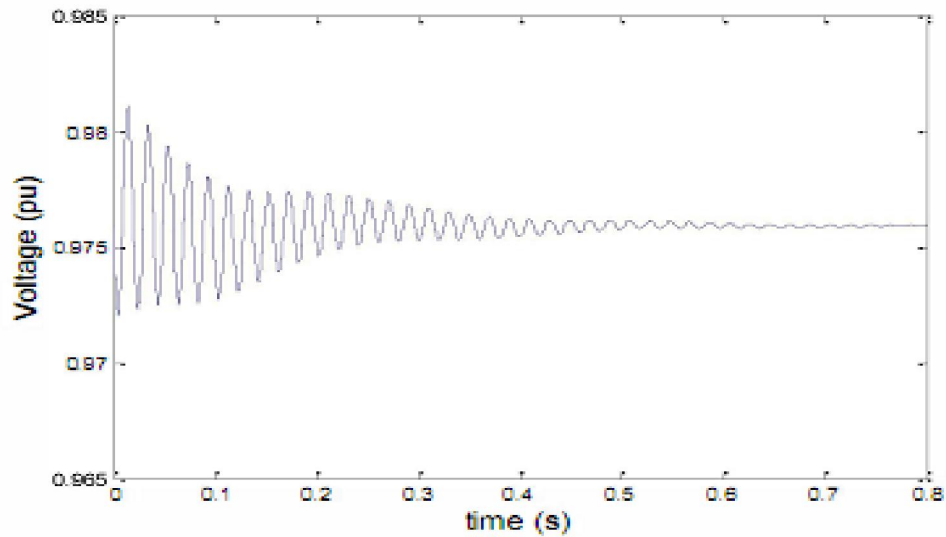
شکل ۳-۴. ولتاژ باس ۹ در حالت اتصال DG به باس ۹ در مرجع [۶].



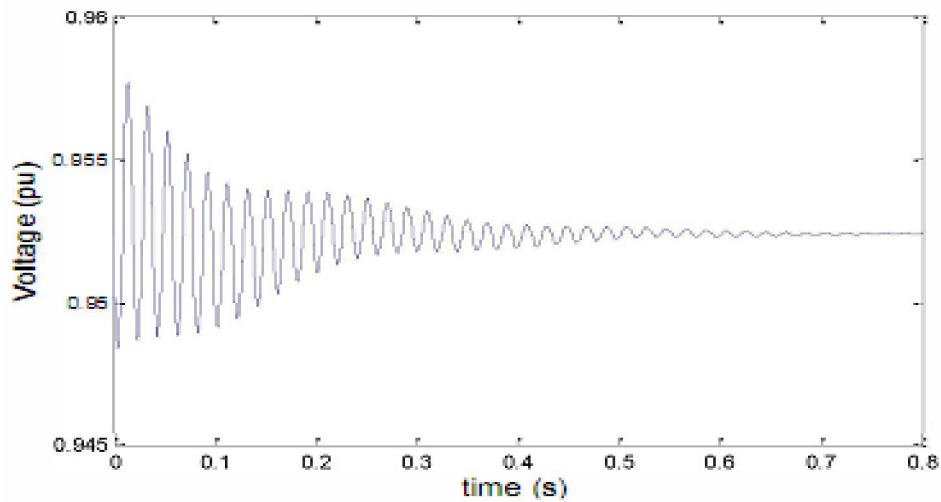
شکل ۳-۵. ولتاژ باس ۱۰ در حالت اتصال DG به باس ۹ در مرجع [۶].

همچنین ولتاژ حالت گذرای باس‌های ۵ و ۱۰ در حالتی که DG به باس شماره ۵ متصل می‌-

گردد مطابق شکل (۶-۳) و (۷-۳) می‌باشند.



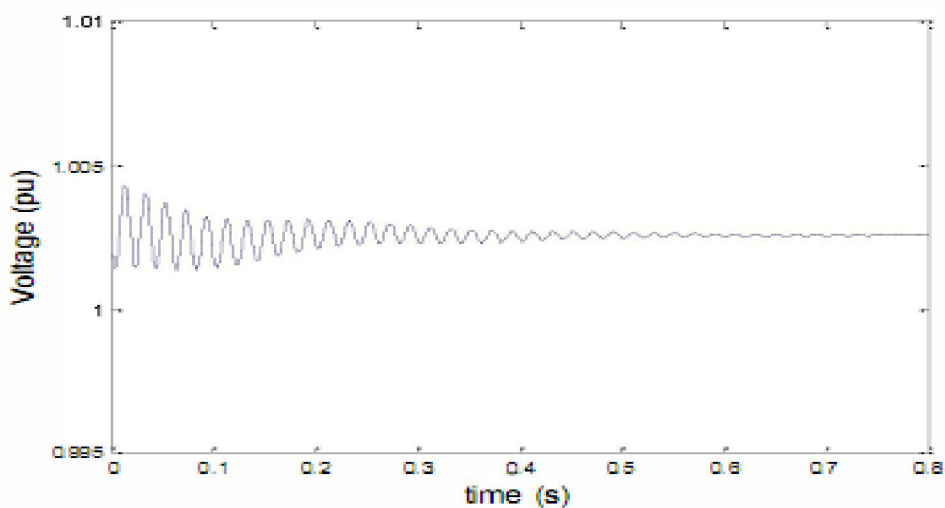
شکل ۳-۶. ولتاژ باس ۵ در حالت اتصال DG به باس ۵ در مرجع [۶].



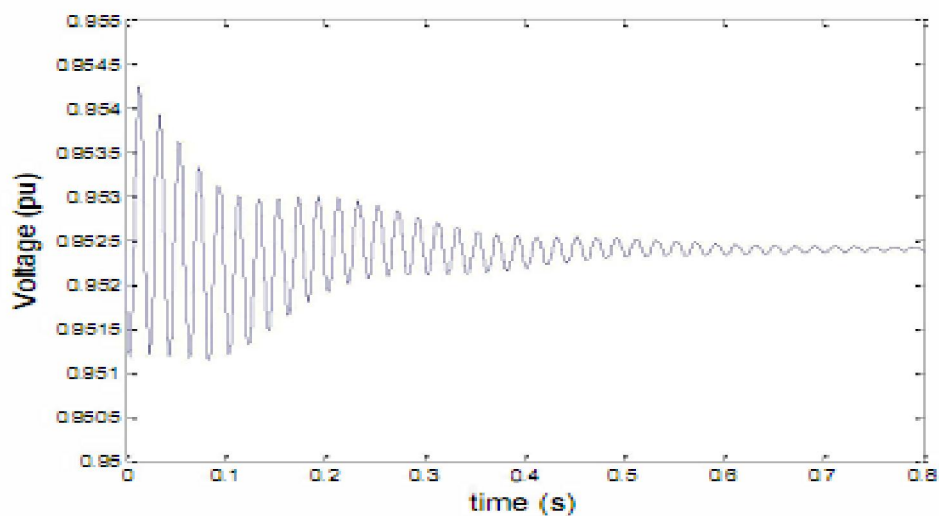
شکل ۳-۷. ولتاژ باس ۱۰ در حالت اتصال DG به باس ۵ در مرجع [۶].

ولتاژ حالت گذرای باس‌های ۱ و ۱۰ در حالتی که DG به باس شماره ۱ متصل می‌گردد مطابق

شکل‌های (۸-۳) و (۹-۳) می‌باشند.



شکل ۳-۸. ولتاژ باس ۱ در حالت اتصال DG به باس ۱ در مرجع [۶].



شکل ۳-۹. ولتاژ باس ۱۰ در حالت اتصال DG به باس ۱ در مرجع [۶].

با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که در حالت‌های اول و دوم که DG به باس‌های ۵ و ۹ متصل می‌شود ولتاژ گذرای باس ۱۰ به حدی می‌رسد که از محدوده پایینی تغییرات مجاز ولتاژ در سیستم که ۹۵٪ پریونیت می‌باشد نیز گذر می‌کند. اما در حالت سوم این اتفاق نمی‌افتد. به طور کلی هرچه باس DG به باس متصل به سیستم قدرت نزدیک‌تر باشد تأثیرات ولتاژ گذرای آن کمتر خواهد بود.

۳-۵ تأثیر DG بر روی کنترل ولتاژ

سطح ولتاژ در سیستم‌های توزیع همواره باید در محدوده معینی باشد؛ زیرا تجهیزات نصب‌شده در سیستم‌های توزیع و وسایل برقی مشترکین برای این محدوده خاص طراحی شده‌اند و فقط در این محدوده خاص به درستی کار می‌کنند. در استانداردهای مختلف این محدوده مجاز ذکر گردیده است که جدول (۳-۳) بعضی از این استانداردها را نشان می‌دهد [۷].

جدول ۳-۳. استانداردها [۷]

<i>Voltage level</i>	<i>IEC</i> <i>IEC61000-2-</i> <i>Low Voltage</i>	<i>CENELEC</i> <i>EN 50160</i> <i>Low and</i> <i>Medium</i>	<i>EDF</i> <i>Contract emeraude</i> <i>Medium Voltage</i> <i>High Voltage</i> <i>HV. $\pm 8\%$ MV. $\pm 5\%$</i>	<i>ESKOM</i> <i>ESKASSA 18</i> <i>Medium</i> <i>Voltage</i> $\pm 10\%$
	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$		

تغییرات بارهای اکتیو و راکتیو در سیستم‌های توزیع منجر به تغییرات ولتاژ می‌گردد. این نوسانات ولتاژ در انتهای خطوط بیشتر می‌باشد به خصوص اگر تمرکز بارها بیشتر در انتهای خطوط باشد، نوسانات ولتاژ شدیدتر می‌گردد [۷]. با توجه به جدول (۳-۴) مشاهده می‌گردد که در یک سیستم توزیع (بدون استفاده از جبران‌کننده‌ها) طول خط در جریان نامی، قبل از آن که نوسانات ولتاژ از محدوده مجاز خارج گردد، تنها چند کیلومتر بیشتر نمی‌باشد.

جدول ۳-۴. ویژگی‌های خطوط هوایی ۱۱ کیلوولت [۷]

نوع سیم	جریان نامی (A)	نسبت X/R	تلفات سه فاز در هر ۱۰ کیلومتر	طول خط برای کاهش ۱۲٪ افت ولتاژ مقاومتی
GOPHER	۱۴۵	۰,۳۰۶	٪۳۰	۴ کیلومتر
FERRET	۲۱۰	۰,۴۷۴	٪۲۷	۴,۴ کیلومتر
MINK	۲۶۵	۰,۶۸۲	٪۲۳	۵,۳ کیلومتر

۶,۵ کیلومتر	۱۸٪	۱,۴۳	۵۲۵	DINGO
-------------	-----	------	-----	--------------

بنابراین در این سیستم‌ها برای جلوگیری از افت ولتاژ باید چاره‌اندیشی صورت گیرد. در سیستم‌های توزیع سنتی تنظیم ولتاژ به دو صورت انجام می‌گیرد.

- کنترل ولتاژ از طریق تب ترانسفورماتور
- کنترل توان راکتیو از طریق جبران‌کننده‌هایی مانند خازن‌های موازی، راکتورهای موازی، خازن‌های سری، کندانسورهای سنکرون، جبران‌کننده‌های SVC و غیره ...

تولیدات پراکنده به دو صورت می‌تواند در نوسانات ولتاژ تأثیر داشته باشد [۷].

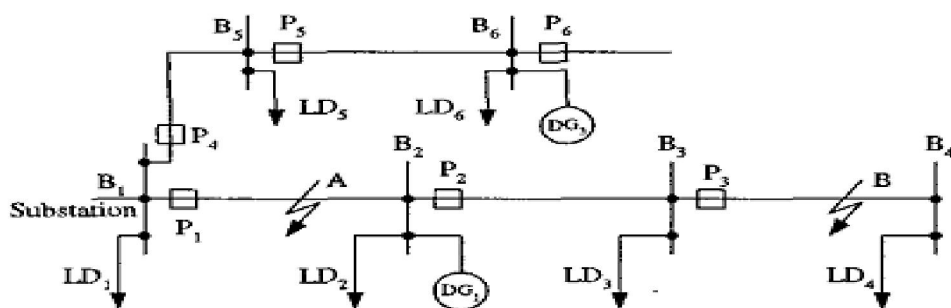
۱. DG هماهنگ با تقاضای بار محلی عمل کند. یعنی هر وقت که تقاضای بار محلی افزایش یافت DG نیز تولید خود را افزایش دهد و هر گاه که تقاضای محلی کاهش یافت DG نیز تولید خود را کاهش دهد. در چنین حالتی DG تغییرات ولتاژ را بین کمینه و بیشینه حد مجاز نسبت به حالتی که DG در سیستم نباشد، کاهش می‌دهد.

۲. DG هماهنگ با تقاضای بار محلی عمل نمی‌کند. مثلاً توربین‌های بادی یا سلول‌های خورشیدی با توجه به میزان تقاضای بار تولید خود را تنظیم نمی‌کنند. بلکه با توجه به میزان وجود منابع طبیعی (باد و خورشید) تولید خود را تنظیم می‌کنند. یا مثلاً سیستم‌های CHP میزان تولید خود را معمولاً بر اساس گرمای مورد تقاضا تنظیم می‌کنند نه برق مورد نیاز سیستم. در چنین حالتی DG ممکن است تغییرات ولتاژ را نسبت به حالتی که DG در سیستم نباشد افزایش می‌دهد. چون ممکن است در زمانی که تقاضای بار کم است DG در حالت تولید پربار قرار داشته باشد و در نتیجه حد بیشینه نوسانات ولتاژ را افزایش می‌دهد.

همچنین DG می‌تواند بعضی مشکلات را در حوزه تنظیم کنترل ولتاژ به وجود آورد. مثلاً در

سیستم شکل (۳-۱۰) در حالت پرباری تب ترانسفورماتور پست افزایش می‌یابد تا ولتاژ باس‌های انتهایی (باس‌های ۴ و ۶) در محدوده ولتاژ مناسب قرار بگیرند. حال وجود DG در باس ۶ و عدم وجود DG در باس ۴ باعث می‌شود که ولتاژ باس ۶ در اثر DG افزایش‌یافته حتی فراتر از محدوده مجاز برسد اما ولتاژ باس شماره ۴ به علت پرباری در محدوده مجاز قرار گیرد. بنابراین در چنین حالتی، راه حل سنتی تغییر تب ترانسفورماتور ناکارآمد خواهد بود.

همچنین DG می‌تواند با تغییر ضریب قدرت باس‌های محلی، ولتاژ را کنترل کند. چنین کاری را توربین‌های بادی که از ادوات الکترونیک قدرت برای تنظیم ولتاژ دینامیکی سیستم توزیع استفاده می‌کنند، انجام می‌دهند [۹].



شکل ۳-۱۰. فیدر توزیع [۹]

۳-۶ حالت گذرا و DG

پایداری حالت گذرا عبارت است از توانایی سیستم قدرت در حفظ سنکرونیسم زمانی که تحت اغتشاشات شدید گذرا قرار می‌گیرد. پایداری حالت گذرا به عوامل مختلفی همچون طراحی شبکه، نوع ژنراتور، پارامترهای ژنراتور، مدت زمان پاکسازی خطای به وجود آمده و غیره بستگی دارد. در کل تأثیر DG در پایداری سیستم‌های توزیع زمانی قابل ملاحظه خواهد بود که ضریب نفوذ این منابع در سیستم زیاد باشد یعنی تعداد این منابع در سیستم قابل ملاحظه باشد. وقتی که تعداد منابع تولید پراکنده در سیستم کم باشد می‌توان از اثرات آن‌ها بر سیستم‌های انتقال صرف‌نظر کرد. اما وقتی تعداد

آن‌ها به مقدار قابل‌ملاحظه می‌رسد نه تنها بر روی سیستم‌های توزیع تأثیرگذارند بلکه حوزه اثرات آن‌ها تا سیستم های انتقال نیز گسترش خواهد یافت. در مرجع [۹] نشان داده شده است که DSG^1 ژنراتورهای سنکرون تأثیر بسیار مفیدی در پایداری سیستم قدرت در هنگام اتصال کوتاه سه فاز دارند.

۳-۷. تأثیر DG بر تلفات توان

ویژگی دیگر نهفته در DG کاستن از تلفات توان در خطوط است. مقدار توان تلف‌شده در خط به جریان جاری‌شده و مقاومت خط انتقال انرژی بستگی دارد. بنابراین کاهش مقاومت یا جریان هر دو به کاهش تلفات منجر می‌شود. واحدهای DG با تزریق توان به شبکه و تأمین بخشی از نیاز مصرف‌کنندگان جریان عبوری از خطوط را کاهش می‌دهند. شاخص کاهش تلفات خط $LLRI^2$ به صورت زیر طبق (۳-۳) تعریف می‌گردد.

$$LLRI = \frac{LL_{W/DG}}{LL_{Wo/DG}} \quad (3-3)$$

که $LL_{W/DG}$ و $LL_{Wo/DG}$ به ترتیب تلفات خطوط در دو حالت بهره‌بردی از DG و عدم به‌کارگیری آن در شبکه هستند و به صورت (۳-۴) و (۳-۵) به دست می‌آیند.

$$LL_{Wo/DG} = 3 \sum_{i=1}^M I_{A,i}^2 RD_i \quad (3-4)$$

$$LL_{W/DG} = 3 \sum_{i=1}^M I_{l,i}^2 RD_i \quad (3-5)$$

در این روابط R مقاومت خطوط بر حسب pu/km ، D_i طول خط توزیع انرژی و M تعداد خطوط در سیستم است. $I_{A,i}^2$ جریان پریونیت خطوط در سیستمی است که بخشی از توان تولیدی آن از واحدهای DG استخراج می‌شود و $I_{l,i}^2$ جریان پریونیت خطوط در سیستمی است که از این

¹ Distributed synchronous generation

² line loss reduction index

واحدها بهره نمی گیرند.

حال سه حالت اتفاق می افتد.

$DG:LLRI < 1$ اثر کاهنده بر تلفات داشته است.

$DG:LLRI = 1$ موثر واقع نشده است.

$DG:LLRI > 1$ اثر افزایشده بر تلفات داشته است.

واضح است چیدمانی که کمترین مقدار $LLRI$ را به دست دهد، بهترین مکان برای استقرار DG

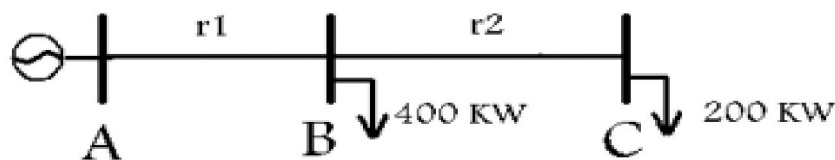
خواهد بود.

مسئله جایی و مقدار یابی بهینه آن ها یکی از مباحث مهم در زمینه تولیدات پراکنده می باشد.

اگر مکان و مقدار DG به صورت مناسبی انتخاب نگردد نه تنها باعث کاهش تلفات نمی گردد، بلکه

باعث افزایش آن نیز می شود. با یک مثال ساده می توان این مسئله را درک نمود. شبکه شعاعی نشان

داده شده در شکل (۱۱-۳) مفروض است.



شکل ۱۱-۳. شبکه شعاعی [۹].

شین A شین اسلک و شین های B ، C شین های بار می باشند. بار شین B ، ۴۰۰ کیلووات و بار

شین C ، ۲۰۰ کیلووات می باشد. مقاومت بین شین های A و B برابر با $r_1 = r$ و مقاومت بین شین های

B و C برابر با $r_2 = 4r$ می باشد.

در حالتی که هیچ منبع تولید پراکنده ای در کار نباشد مقدار تلفات متناسب با (۳-۶) است:

$$LOSS_1 \propto (400)^2 r + (200)^2 (5r) \quad (۳-۶)$$

حال برای مقایسه چند حالت را در نظر می گیریم.

ابتدا فرض می‌کنیم یک منبع با توان ۴۰۰ کیلووات را در شین B قرار می‌دهیم.

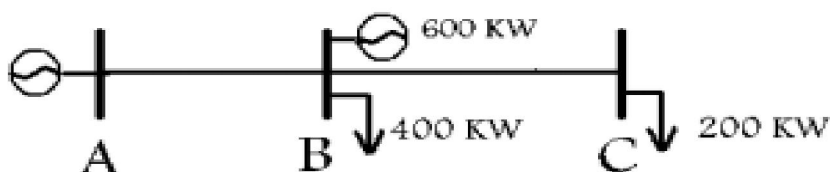


شکل ۳-۱۲. فیدر شعاعی با منبع ۴۰۰ کیلوواتی در باس B [۹].

در این حالت تلفات متناسب با (۷-۳) است:

$$LOSS_2 \propto (200)^2(5r) \quad (7-3)$$

حال فرض می‌شود همین منبع با توان نامی ۶۰۰ کیلووات باشد.

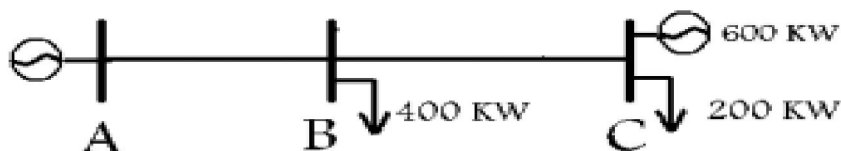


شکل ۳-۱۳. فیدر شعاعی با منبع ۶۰۰ کیلوواتی در باس B [۹].

در این حالت تلفات برابر با (۸-۳) است:

$$LOSS_3 \propto (200)^2(4r) \quad (8-3)$$

حال این منبع ۶۰۰ کیلوواتی را در شین C قرار می‌دهیم.



شکل ۳-۱۴. فیدر شعاعی با منبع ۶۰۰ کیلوواتی در باس C [۹].

در این حالت تلفات متناسب است با (۹-۳):

$$LOSS_4 \propto (400)^2(4r) \quad (9-3)$$

مشاهده می‌گردد که در حالت‌های دوم و سوم با به‌کارگیری مناسب تولید پراکنده تلفات نسبت به حالت اول بهتر شد و کاهش یافت. اما در حالت چهارم با به‌کارگیری نامناسب تولید پراکنده نه تنها تلفات کاهش نیافت بلکه حتی افزایش نیز یافت. بنابراین مسئله جابایی تولید پراکنده در زمینه تلفات بسیار مهم می‌باشد.

۳-۸ خلاصه فصل

با توجه به مطالب ذکرشده در این فصل علاوه بر شاخص‌های بهبود پروفایل ولتاژ و شاخص کاهش تلفات خط، تأثیر DG بر پارامترهای مختلفی از جمله کیفیت توان و تزریق توان راکتیو مورد بررسی قرار گرفته است و مشاهده گردید که نسبت به جبران‌کننده‌های استاتیک ارجحیت دارند.

فصل چهارم

روش‌های کنترل اینورتر منبع ولتاژ

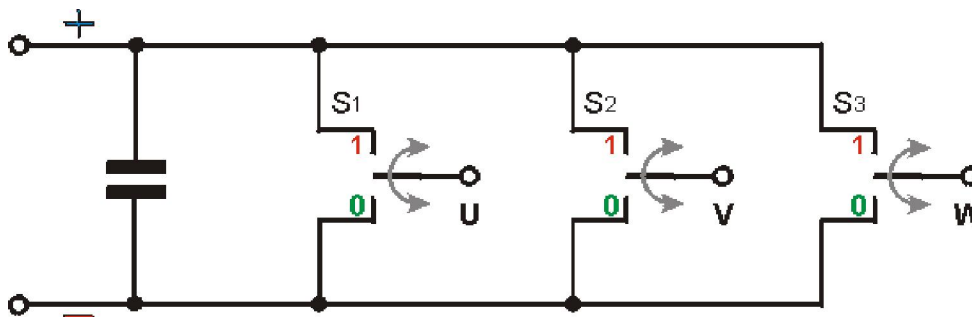
۴-۱ مقدمه

معمولاً حالت‌های روشن و خاموش شدن سوئیچ‌های قدرت در یک پایه یکسو ساز مخالف هم هستند که در اثر آن مدار یکسو ساز سه فاز می‌تواند به سه سوئیچ دو وضعیته ساده شود. مدولاسیون پهنای پالس (PWM) روشی است که در آن پالس‌های ولتاژ کلید زنی با فرکانس و ولتاژ دلخواه تولید می‌گردد.

از میان روش‌های مختلف می‌توان به معروف‌ترین آن‌ها، مدولاسیون پهنای پالس سینوسی ($SPWM$) مدولاسیون پهنای پالس موج مربعی ($square_wave$)، مدولاسیون پهنای پالس کنترل جریان باند هیستریزیس ($HBCC$)، مدولاسیون فضای برداری ($SVPWM$) و مدولاسیون پهنای پالس کنترل جریان پیش‌گویانه اشاره کرد. البته روش‌های متعدد (PWM) که مربوط به تکنیک‌های مختلف مدولاسیون پهنای پالس بهینه می‌باشد نیز وجود دارد که ما در اینجا به آن‌ها نخواهیم پرداخت. در این قسمت بعضی از روش‌های مدولاسیون پهنای پالس به طور اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس این روش‌ها را به یک اینورتر سه فاز تغذیه‌کننده سیستم تولید پراکنده در حالت متصل به شبکه اعمال خواهیم کرد.

۴-۲ مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری $SVPWM$

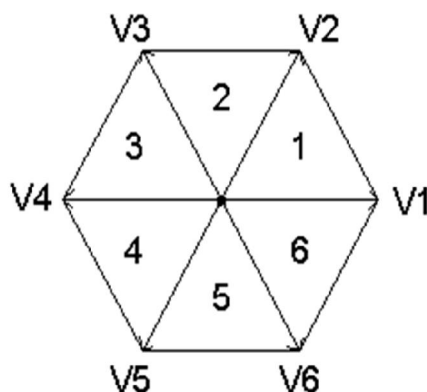
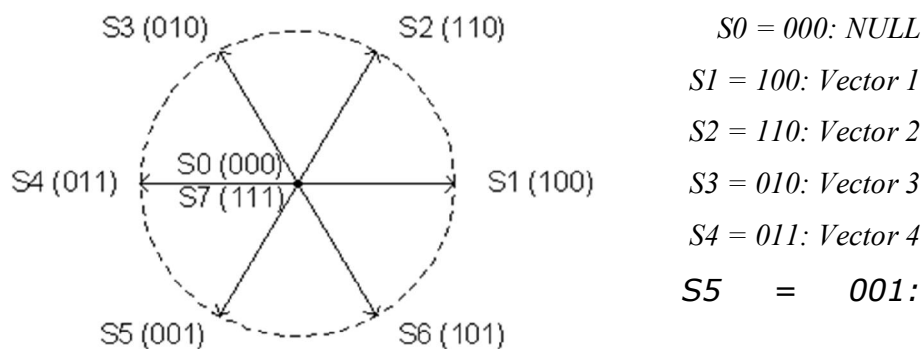
مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری ($SVPWM$) [۱۰] یک ابزار مناسب برای تولید ولتاژ سه فاز با دامنه و فرکانس دلخواه است. در ساختار اینورتر منبع ولتاژ سوئیچ‌های یک پایه به صورت مکمل کلید زنی می‌شوند. بنابراین اینورتر سه فاز همان طور که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است به سه سوئیچ دو وضعیته تبدیل می‌گردد.



شکل ۴-۱. نمایش اینورتر منبع ولتاژ سه فاز با سوئیچ‌های دو وضعیت [۱۲]

همان طور که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، اینورتر سه فاز منبع ولتاژ ۸ بردار (حالت)

کلید زنی دارد که شامل ۶ بردار فعال و ۲ بردار صفر (*Null*) می‌باشد.



شکل ۴-۲. بردارهای کلید زنی و *sector* های شش گانه اینورتر منبع ولتاژ سه فاز [۱۱]

اگر شش بردار غیر صفر را به صورت $V_1 (= S_1), \dots, V_6 (= S_6)$ در نظر بگیریم، آنگاه

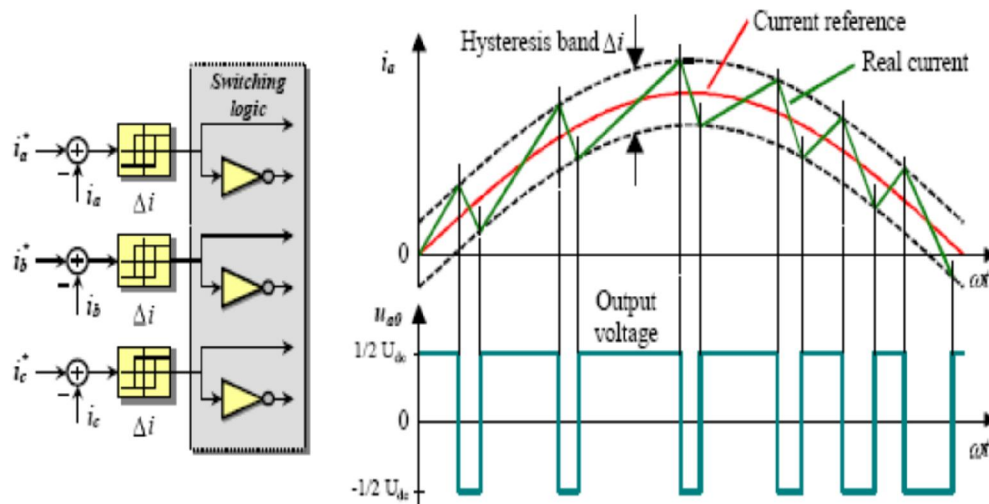
۶ بخش (*sector*) ۱ تا ۶ را پدید می‌آورند. در داخل هر بخش می‌توان هر بردار ولتاژ برآیند با زاویه

دلخواه را به دست آورد. آنچه که در مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری مورد توجه است، اتخاذ یک ترتیب کلید زنی مناسب در یک سیکل است که به کمترین اعوجاج هارمونیکی کل (THD) و کاهش تلفات سوئیچ منجر گردد. چندین روش متفاوت برای تولید بردارهای برآیند وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. از معروفترین روشهای مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری ($SVPWM$) می‌توان به *Right Aligned Sequence*، *Symmetric Sequence* و... اشاره کرد. توصیف کامل تکنیک مدولاسیون $SVPWM$ و روند محاسبه فواصل زمانی و اعمال پالس‌ها و سایر موارد مربوطه در مراجع [۱۰، ۱۱، ۱۴] آمده است.

۴-۳ کنترل مدولاسیون پهنای پالس هیستریزیس

کنترل جریان باند هیستریزیس، یک روش کنترلی مدولاسیون است که مستقیماً برای کنترل جریان استفاده می‌شود. این روش در اجرا بسیار ساده می‌باشد و همچنین دانستن اطلاعات دقیق بار و سیستم مورد نیاز نمی‌باشد و دارای پاسخ دینامیکی بسیار مناسبی است. همان طور که در شکل (۴-۳) نشان داده شده است حالت‌های کلید زنی توسط سه کنترل‌کننده هیستریزیس ایجاد می‌گردد. کنترل جریان هیستریزیس که به کنترل *bang-bang* نیز معروف است به صورت مجزا برای سه فاز اجرا می‌گردد. هر کنترل‌کننده، حالت سوئیچینگ یک پایه را تعریف می‌کند به طوری که خطای حاصل از جریان مرجع و جریان واقعی داخل باند هیستریزیس (Δi) قرار می‌گیرد. در این روش سیگنال خطای حاصل از مقایسه جریان مرجع و جریان واقعی در یک باند فرضی قرار داده می‌شود و از برخورد سیگنال خطا به باند بالا و پایین حالت‌های مختلف کلید زنی تعریف می‌گردد. عملکرد دینامیکی این روش کنترلی بسیار عالی است و به دلیل حذف یک کنترل‌کننده جریان اضافی، وابستگی به پارامترهای موتور را بسیار کاهش می‌دهد. درعین حال از نقاط ضعف این روش می‌توان به ثابت نبودن فرکانس سوئیچینگ و افزایش فرکانس سوئیچینگ اشاره کرد. کنترل جریان هیستریزیس در فرکانس کلید زنی بالاتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و به همین دلیل تلفات کلید زنی، کاربرد آن را

به سطوح قدرت پایین تر محدود می‌کند. به دلیل مستقل بودن از پارامترهای بار، کنترل جریان باند هیستریزیس اغلب برای موتورهای پله‌ای و موتورهای رلکتانسی به کار می‌روند. این روش مدولاسیون پهنای پالس به دو روش کلید زنی دو قطبی و تک قطبی قابل اجرا می‌گردد [۱۴، ۱۲].

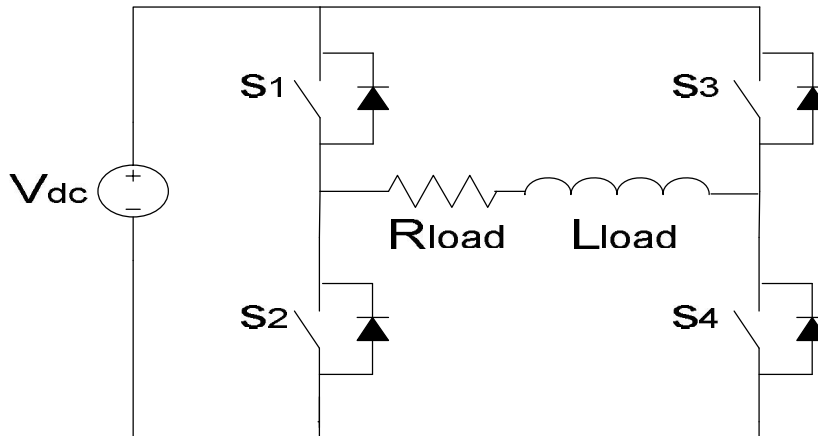


شکل ۴-۳. کنترل جریان هیستریزیس، شما تیک حالت‌های کلید زنی [۱۲]

کنترل جریان باند هیستریزیس، توسط یک سیستم حلقه بسته اجرا می‌گردد که در آن از سیگنال خطای حاصل از مقایسه بین جریان خواسته شده (i_{ref}) و جریان واقعی اینورتر (i_{actual}) برای کنترل سوئیچ‌های اینورتر استفاده می‌گردد و طبق معادله (۴-۱) بیان می‌شود.

$$Error(t) = i_{actual}(t) - i_{ref}(t) \quad (4-1)$$

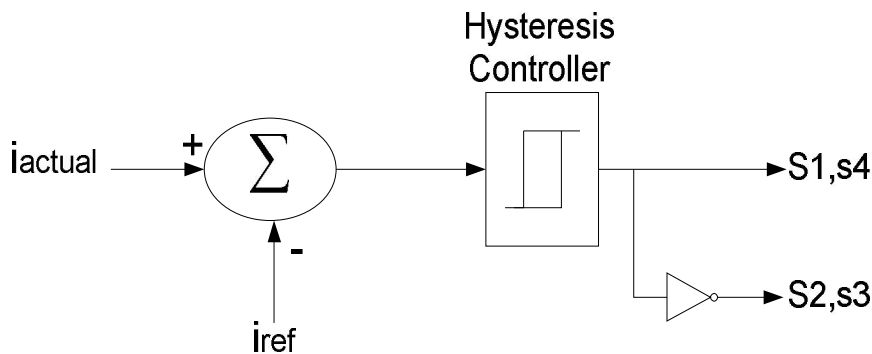
از شاخص‌های این روش سادگی اجرا، پاسخ بسیار سریع حلقه جریان، پایداری مناسب و محدودسازی پیک جریان می‌باشد و نقاط ضعف آن شامل فرکانس کلید زنی متغیر و افزایش فرکانس کلید زنی است. شکل (۴-۴) ساختار یک اینورتر تک فاز تمام پل را نشان می‌دهد. کنترل جریان باند هیستریزیس برای آن به دو روش کلید زنی دوقطبی و تک قطبی امکان پذیر می‌باشد.



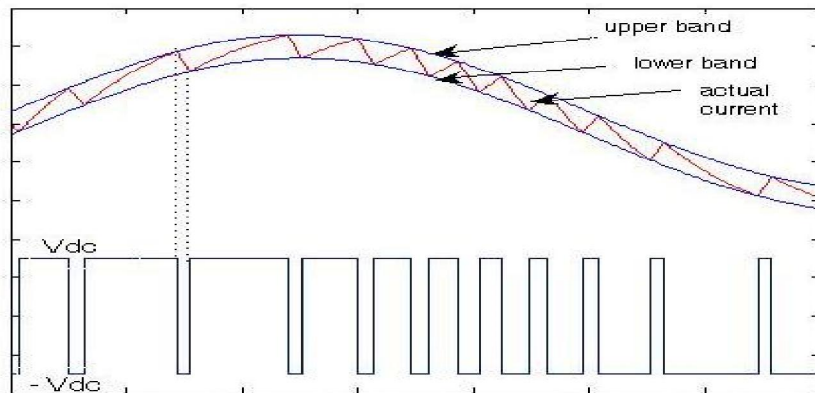
شکل ۴-۴. ساختار یک اینورتر تک فاز تمام پل [۱۲]

۴-۳-۱ کنترل جریان باند هیستریزیس با کلید زنی دو قطبی (bipolar)

در کنترل دو قطبی [۱۲] زوج سوئیچ‌های قطری ($S1, S4$ یا $S2, S3$) در یک لحظه خاموش و روشن می‌گردند و کلیدهای هر پایه به صورت مکمل همدیگر کلید زنی می‌شوند. در نتیجه دو حالت اتصال وجود دارد که سطوح ولتاژ $+V_{dc}$ و $-V_{dc}$ را در پایانه اینورتر ایجاد می‌کند. همان طور که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است برای کنترل جریان هیستریزیس یک اینورتر تک فاز با کلید زنی دوقطبی، سیگنال خطای حاصل از مقایسه جریان واقعی و جریان بار مرجع به یک کنترل‌کننده جریان هیستریزیس داده می‌شود که پالس خروجی به سوئیچ‌های ($S4, S1$) و متمم آن به سوئیچ‌های ($S2, S3$) اعمال می‌گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۵. کنترل جریان باند هیستریزس با کلید زنی دو قطبی (الف) : اعمال پالس به سوئیچ ها (ب) : شکل

موج جریان کنترل شده با باندهای بالا و پایین و ولتاژ دو قطبی [۱۲]

۴-۴ مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM)

در مدولاسیون پهنای پالس سینوسی [۱۶]، ولتاژهای مرجع سه فاز با دامنه و فرکانس متغیر، در سه مقایسه‌گر مجزا با یک موج حامل مثلثی با دامنه و فرکانس ثابت مورد مقایسه قرار می‌گیرند. خروجی هر مقایسه‌گر حالت‌های سوئیچینگ پایه مربوطه در یکسو ساز سه فاز را در این نوع از کلید زنی تشکیل می‌دهد.

نحوه ایجاد پالس‌های ارسالی به گیت سوئیچ‌ها در روش PWM از مقایسه شکل موج دلخواه با موج مثلثی با دامنه برابر ولتاژ منبع DC و فرکانسی برابر فرکانس سوئیچینگ می‌باشد. بطوریکه اگر شکل موج از موج مثلثی بزرگ‌تر شد سوئیچ روشن و به طور عکس اگر کوچک‌تر شد سوئیچ خاموش شود.

همچنین بر اساس اینکه از چه نوع شکل موج مثلثی برای مقایسه استفاده می‌شود این روش به دو گروه PWM تک جهته یا دو جهته تقسیم می‌شود بطوریکه اگر فرکانس PWM دو جهته را برابر با f_s (فرکانس سوئیچینگ) در نظر بگیریم آنگاه فرکانس PWM تک جهته $2f_s$ خواهد بود. مزیت دو برابر شدن فرکانس سوئیچینگ در طیف هارمونیک ولتاژ خروجی نمود پیدا می‌کند، زیرا پایین‌ترین

هارمونیک‌ها به عنوان باندهای کناری فرکانسی در دو برابر فرکانس سوئیچینگ ظاهر می‌شوند.

۱- روش تک جهته^۱

۲- روش دو جهته^۲

در روش اول موج مثلثی که اساس کار در روش PWM است، در یک جهت وجود دارد ولی در

روش دوم، این موج مثلثی از $\frac{V_{DC}}{2}$ تا $\frac{V_{DC}}{2}$ تغییر می‌کند.

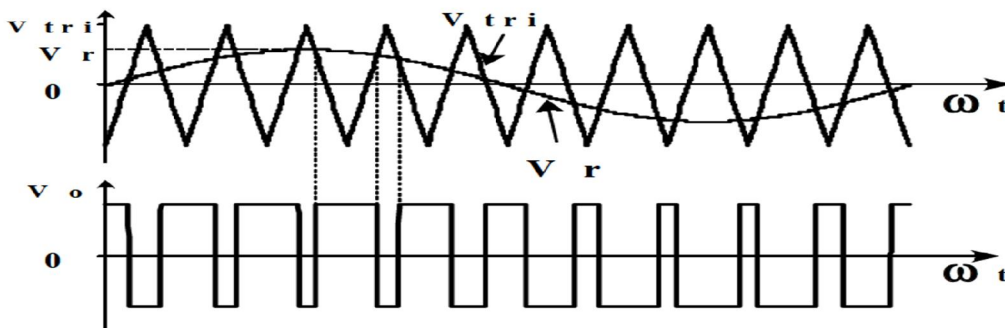
در روش PWM ، علاوه بر وجود شکل موج مثلثی با فرکانس بالا (در حد فرکانس سوئیچینگ)، ما

به شکل موج مطلوب خروجی هم نیاز داریم. اساس کار بر مقایسه این دو موج می‌باشد؛ یعنی موج

مثلثی و موج مرجع. در حالتی که موج مثلثی دارای مقدار بیش تری از موج مرجع شد، مقدار صفر و

در صورت بیش تر شدن موج مرجع از موج مثلثی، مقدار یک تولید خواهد شد. شکل (۴-۶) به صورت

شماتیک این مسئله را نشان می‌دهد [۱۳].



شکل ۴-۶: نمای شماتیک از ایجاد پالس [۱۳]

۴-۵ سیستم تولید پراکنده DG با اینورتر سه فاز در حالت متصل به

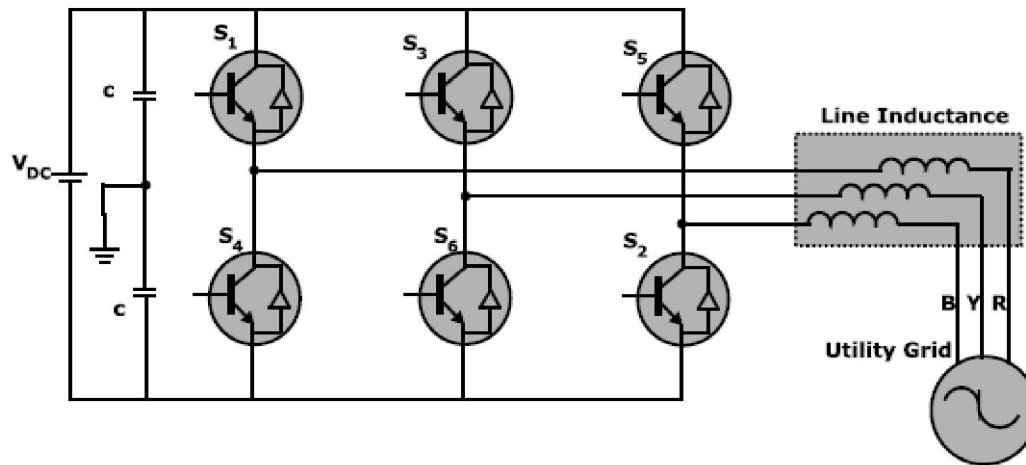
شبکه

یک سیستم تولید پراکنده که از یک اینورتر سه فاز به عنوان رابط شبکه با سیستم DG

¹ unipolar

² bipolar

استفاده شده در شکل (۷-۴) نشان داده شده است.



شکل ۷-۴. اینورتر سه فاز متصل به شبکه [۱۲]

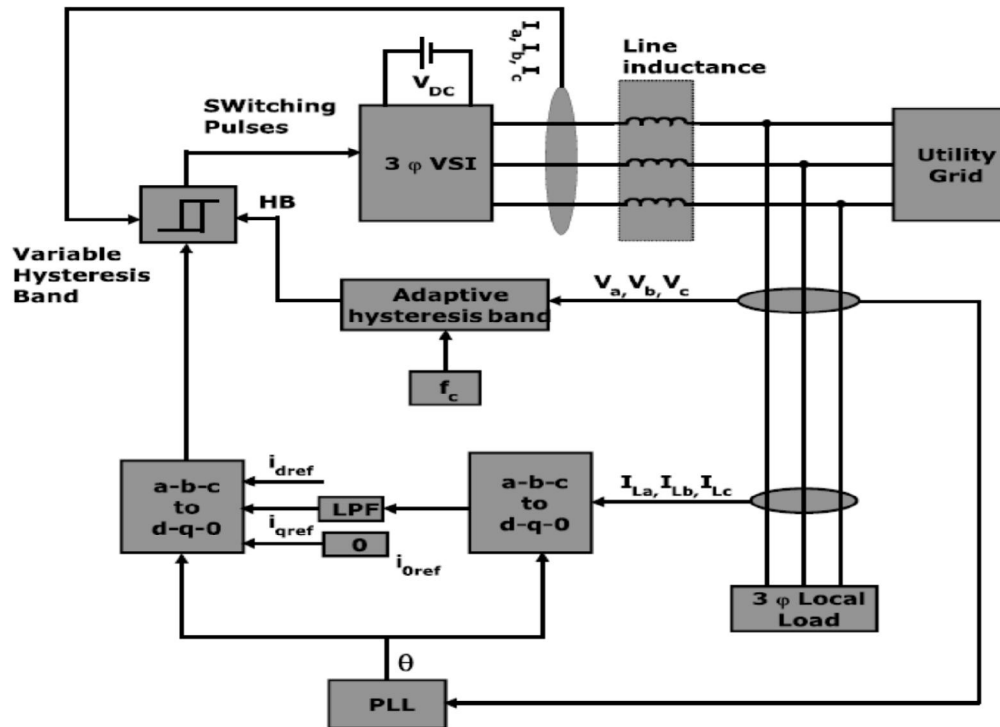
استراتژی کنترل جریان اینورتر متصل به شبکه نقش بسیار مهمی را در ایجاد کیفیت توان بالا برای شبکه الکتریکی بازی می‌کند. ما در این قسمت با استفاده از استراتژی *SVPWM* و هیستریزیس را به این اینورتر اعمال می‌کنیم و ولتاژ در نقطه *PCC* را در دو حالت به طور کامل بررسی خواهیم کرد.

۴-۶ اعمال روش کنترل جریان هیستریزیس به اینورتر

قبل از اعمال روش هیستریزیس به اینورتر [۱۴]، جریان‌های سه فاز بار را با استفاده از تبدیل پارک به سه جریان در قالب سنکرون تبدیل خواهیم کرد. اگر i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc} سه جریان سه فاز بار باشند طبق معادله (۲-۴) خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - (2\pi/3)) & \cos(\omega t + (2\pi/3)) \\ \sin(\omega t) & -\sin(\omega t - (2\pi/3)) & -\sin(\omega t + (2\pi/3)) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

که در آن iLo , iLq , iLd سه جریان بارها در قالب سنکرون می‌باشد. بلوک دیاگرام روش کنترل جریان هیستریزیس اعمال شده به اینورتر در شکل (۸-۴) نشان داده شده است.



شکل ۸-۴. بلوک دیاگرام روش کنترل جریان هیستریزیس تطبیقی پیشنهاد شده در [۱۲] اعمال شده به اینورتر همان طوری که در شکل (۸-۴) مشاهده می‌شود، از یک فیلتر پایین گذر برای به دست آوردن مؤلفه dc جریان iLq استفاده می‌شود که این مؤلفه به عنوان جریان مرجع مؤلفه q اینورتر در نظر گرفته می‌شود. در قالب سنکرون جریان مرجع محور d ، تزریق میزان توان اکتیو را کنترل می‌کند و می‌تواند از کنترل‌کننده‌های دیگر با توجه به منبع DG تولید شود. جریان‌های سه فاز مرجع abc با استفاده از تبدیل معکوس پارک و به صورت (۳-۴) به دست خواهند آمد:

$$\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{bref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 1 \\ \sin(\omega t - (2\pi/3)) & \cos(\omega t - (2\pi/3)) & 1 \\ \sin(\omega t + (2\pi/3)) & \cos(\omega t + (2\pi/3)) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \\ i_{0ref} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

با توجه به شکل (۴-۸)، از یک حلقه قفل شده فاز PLL سه فاز برای آشکارسازی زاویه ولتاژ شبکه در هر لحظه استفاده شده است. برای اعمال روش کنترل جریان هیستریزیس متداول که در بخش قبل توضیح داده شده است ما ابتدا تفاوت بین مقدار لحظه‌ای جریان و مقدار مرجع آن را طبق (۴-۴) به دست می‌آوریم. یعنی:

$$W = i_i - i_{ref} \quad (i = a, b, c) \quad (4-4)$$

به عنوان مثال با توجه به شکل (۴-۷) برای فاز a داریم:

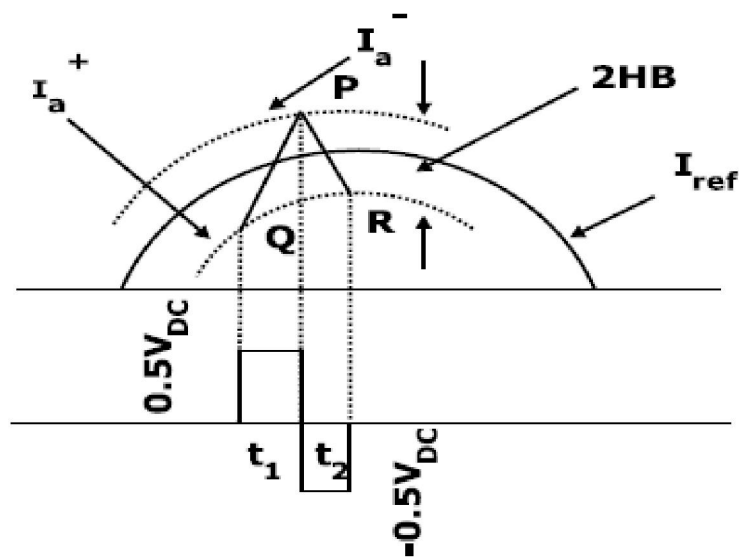
$$\text{if } W = i_a - i_{ref} > HB \quad S4 = 0, S1 = 1$$

$$\text{if } W = i_a - i_{ref} < HB \quad S4 = 1, S1 = 0$$

i_{ref}

HB پهنای باند کنترل‌کننده نامیده می‌شود. به همین ترتیب می‌توان برای فازهای b و c بیان

کرد. در روش کنترل جریان هیستریزیس میزان تغییرات جریان خط، فرکانس کلید زنی را تغییر می‌دهد. بنابراین فرکانس کلید زنی در طول مرحله کلید زنی ثابت باقی نخواهد ماند و همراه با شکل موج جریان تغییر خواهد کرد. میزان اندوکتانس اینورتر متصل به شبکه و ولتاژ خط dc پارامترهای اصلی در تعیین میزان تغییرات جریان‌های خط اینورتر می‌باشند. همان طوری که قبلاً گفته شد پهنای باند کنترل‌کننده جریان هیستریزیس میزان خطای مجاز جریان را تعیین می‌کند. با تغییر پهنای باند می‌توان فرکانس کلید زنی متوسط را کنترل و عملکرد سیستم را به ازای مقادیر مختلف پهنای باند ارزیابی کرد. حال می‌خواهیم یک روش کنترل جریان هیستریزیس با فرکانس کلید زنی ثابت برای کنترل اینورتر استفاده کنیم. شکل (۴-۹)، شکل موج‌های ولتاژ و جریان فاز a را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۴. موج‌های جریان و ولتاژ با کنترل جریان هیستریزس

با توجه به نحوه تغییرات جریان‌های کاهشی i_a^- و افزایشی i_a^+ در شکل (۹-۴) می‌توان به

صورت معادلات (۵-۴) و (۶-۴) نوشت:

$$di_a^+ = \frac{1}{l}(0.5v_{DC} - v_a) \quad (۵-۴)$$

$$di_a^- = -\frac{1}{l}(0.5v_{DC} + v_a) \quad (۶-۴)$$

همچنین با توجه به شکل (۹-۴) و طبق معادلات (۷-۴) و (۸-۴) و (۹-۴) داریم:

$$\frac{di_a^+}{dt}t_1 - \frac{di_{aref}}{dt}t_1 = 2HB \quad (۷-۴)$$

$$\frac{di_a^-}{dt}t_2 - \frac{di_{aref}}{dt}t_2 = -2HB \quad (۸-۴)$$

$$t_1 + t_2 = T_c = \frac{1}{f_s} \quad (۹-۴)$$

که t_1 و t_2 فواصل کلید زنی و f_c فرکانس کلید زنی می‌باشند. با جمع کردن معادلات (۷-۴) و

(۸-۴) و قرار دادن حاصل در (۹-۴) طبق معادله (۱۰-۴) به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\frac{di_a^+}{dt} t_1 + \frac{di_a^-}{dt} t_2 - \frac{1}{f_c} \frac{di_{aref}}{dt} = 0 \quad (۱۰-۴)$$

با کم کردن معادله (۸-۴) از (۷-۴) طبق معادله (۱۱-۴) به صورت زیر خواهیم داشت :

$$\frac{di_a^+}{dt} t_1 - \frac{di_a^-}{dt} t_2 - (t_1 - t_2) \frac{di_{aref}}{dt} = 4HB \quad (۱۱-۴)$$

با قرار دادن (۶-۴) در (۱۱-۴) به صورت (۱۲-۴) خواهیم داشت:

$$(t_1 + t_2) \frac{di_a^+}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{di_{aref}}{dt} = 4HB \quad (۱۲-۴)$$

با قرار دادن (۶-۴) در (۱۰-۴) و حل کردن آن به صورت (۱۳-۴) داریم:

$$(t_1 - t_2) = \frac{di_{aref} / dt}{f_c (di_a^+ / dt)} \quad (۱۳-۴)$$

با قرار دادن (۱۳-۴) در (۱۲-۴) به صورت (۱۴-۴) داریم:

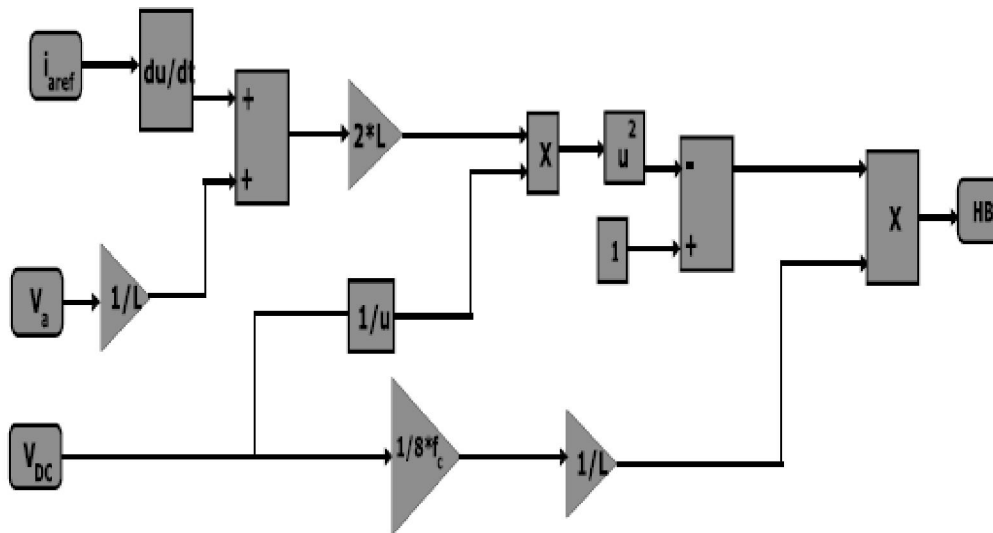
$$HB = \frac{0.125 V_{DC}}{f_c L} \left[1 - \frac{4L^2}{V_{DC}^2} \left(\frac{V_a}{L} + m \right)^2 \right] \quad (۱۴-۴)$$

m در معادله (۱۴-۴) شیب جریان مرجع فاز a می باشد و برابر است با $m = di_{aref}/dt$ در واقع

معادله (۱۴-۴) را می توان پهنای باند فاز a نامید و به صورت HB_a نشان داد. شکل (۱۰-۴) محاسبه

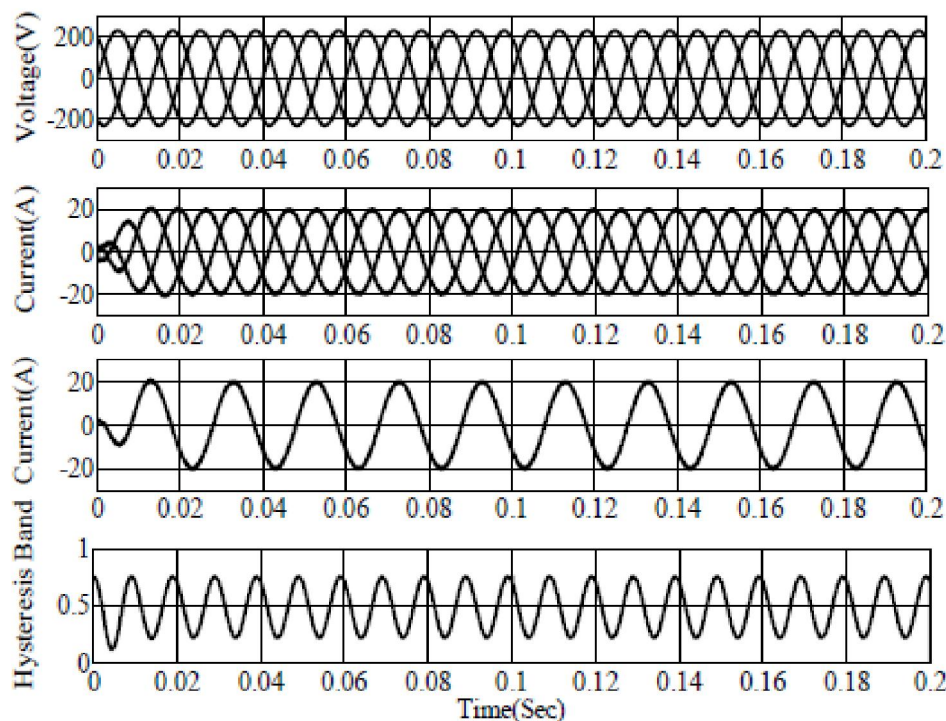
پهنای باند فاز a را برای کنترل هیستریزیس تطبیقی پیشنهاد شده نشان می دهد. به طور مشابه می توان

پهنای باند فازهای HB_c , HB_b را به صورت بالا به دست آورد.



شکل ۴-۱۰. بلوک دیاگرام محاسبه پهنای باند هیستریزس تطبیقی [۱۰]

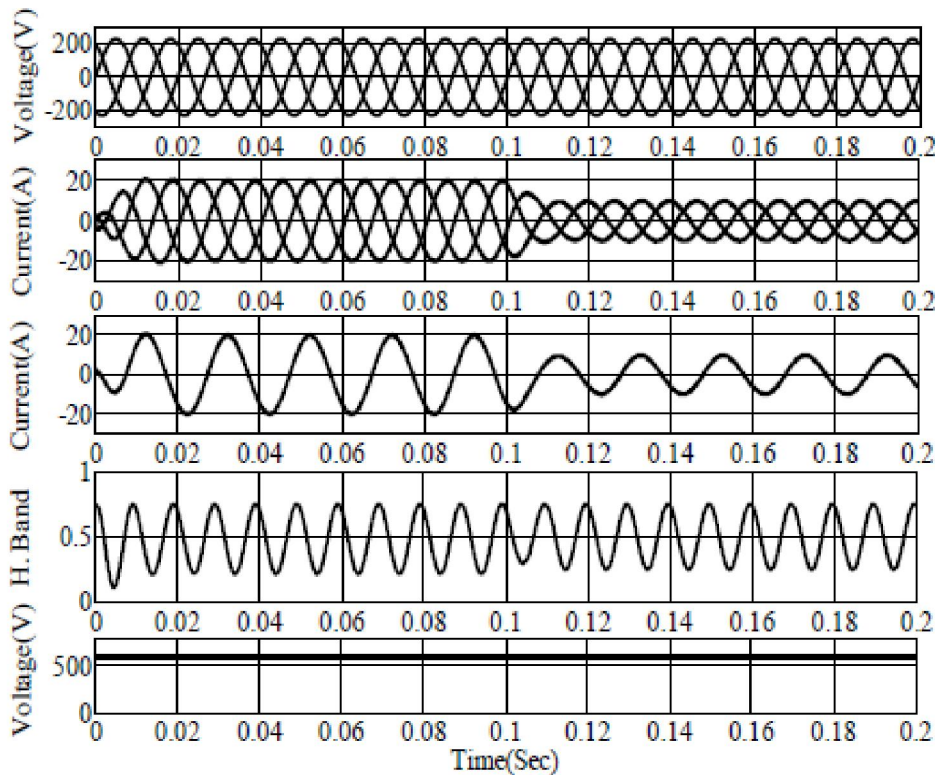
حال با پهنای باند محاسبه شده در روش پیشنهادی و استفاده از سیستم کنترل نشان داده شده در شکل (۴-۸) به کنترل اینورتر شکل (۴-۷) می پردازیم. با اعمال روش کنترل جریان هیستریزس تطبیقی پیشنهادی به اینورتر در حالت پایدار ولتاژ نقطه PCC ، جریان شبکه، جریان های خروجی اینورتر و پهنای باند به صورت شکل (۴-۱۱) خواهد شد. پارامترهای سیستم به صورت زیر است: ولتاژ فاز شبکه ۲۳۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز، ولتاژ خط dc برابر ۶۰۰ ولت، اندوکتانس خط ۵ میلی هانری و خازن خط dc برابر ۲۲۰۰ میکرو فاراد.



شکل ۴-۱۱. نتایج شبیه‌سازی حالت پایدار کنترلر جریان هیستریزس تطبیقی a ، ولتاژ شبکه در PCC b

جریان شبکه c ، جریان فاز خروجی اینورتر d ، باند هیستریزس [۱۴]

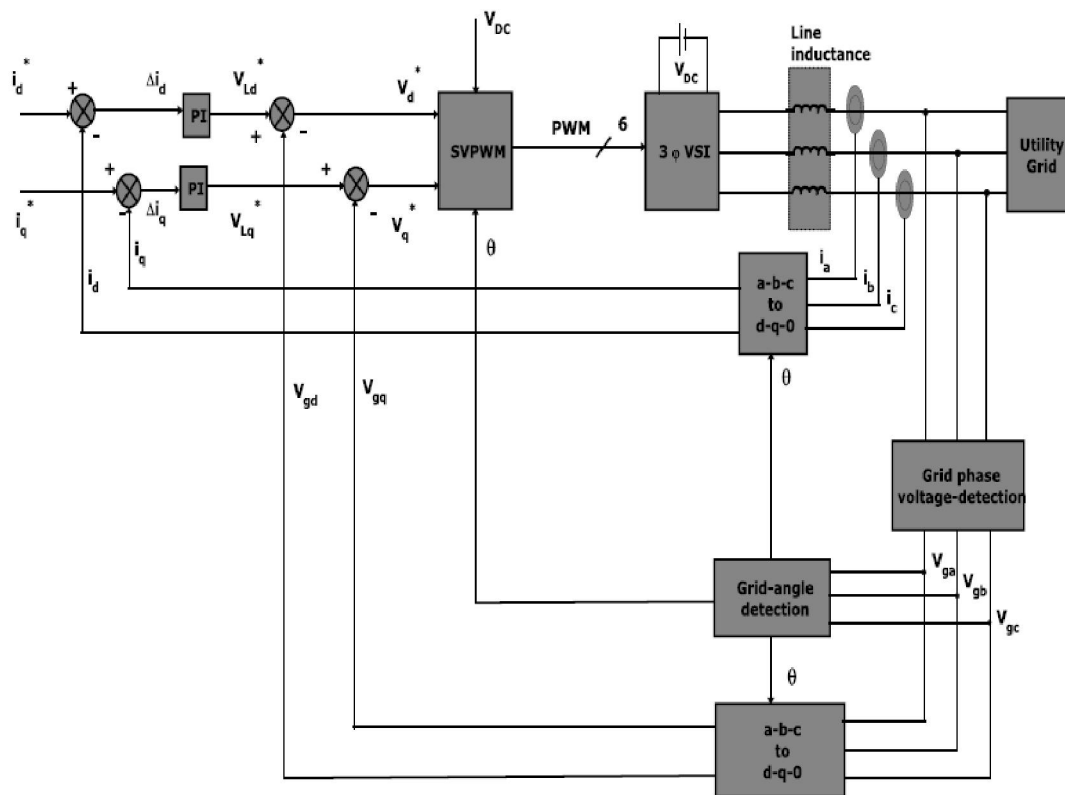
به منظور ارزیابی پاسخ دینامیک روش کنترل هیستریزس پیشنهاد شده یک تغییر پله ناگهانی به بار اینورتر اعمال می‌کنیم و جریان بار را در زمان $t=0,1$ ثانیه از ۲۰ آمپر به ۱۰ آمپر کاهش می‌دهیم. در این شرایط معمولاً جریان شبکه دچار اعوجاج شده و این امر باعث افزایش THD در نقطه PCC می‌گردد. اما به علت عملکرد مناسب کنترل‌کننده هیستریزس تطبیقی، جریان بار جریان مرجع و فرمان را با سرعتی سریع‌تر دنبال کرده و جریان شبکه به پاسخ سینوسی میل خواهد کرد. شکل موج-های نتایج شبیه‌سازی در حالت گذرا در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲. نتایج شبیه‌سازی حالت گذرا کنترلر جریان هیستریزیس تطبیقی a ولتاژ شبکه در PCC b جریان شبکه c . جریان فاز خروجی اینورتر d . باند هیستریزیس e ولتاژ خط dc [۱۰]

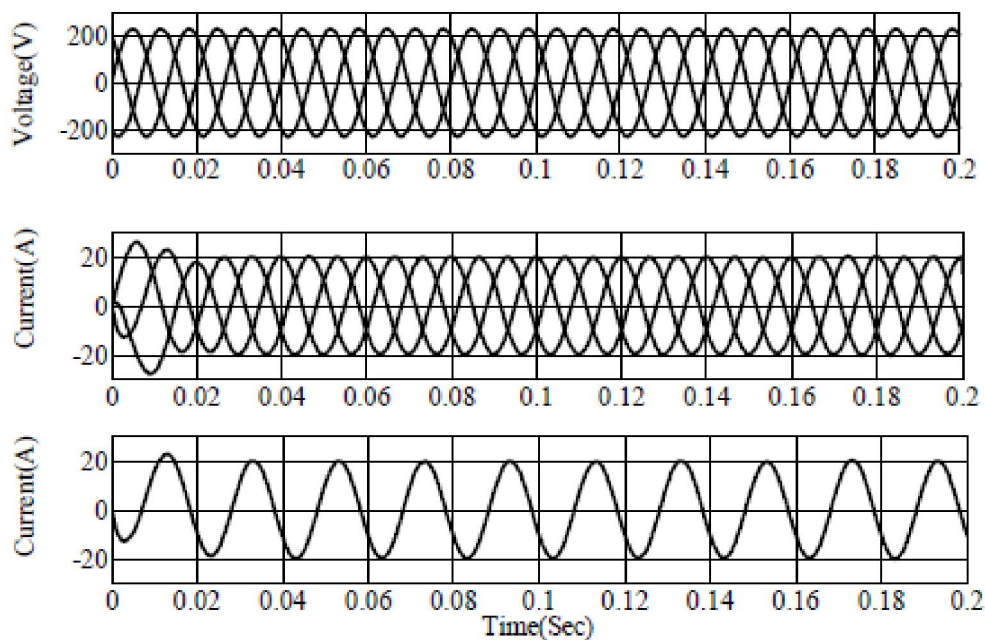
۴-۷ اعمال روش مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی $SVPWM$ به اینورتر

در قسمت‌های قبلی روش کنترل برداری پهنای پالس مدولاسیون توضیح داده شد. در این قسمت ما این روش را به اینورتر نشان داده‌شده در شکل (۴-۷) اعمال خواهیم کرد [۱۱]. بلوک دیگرام کلی سیستم کنترل جریان $SVPWM$ اعمال‌شده به اینورتر در شکل (۴-۱۳) به طور کامل نشان داده شده است. پارامترهای سیستم به صورت زیر است: ولتاژ فاز شبکه ۲۳۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز، ولتاژ خط dc برابر ۴۲۰ ولت، اندوکتانس خط ۵ میلی هانری و خازن خط dc برابر ۲۲۰۰ میکروفاراد.

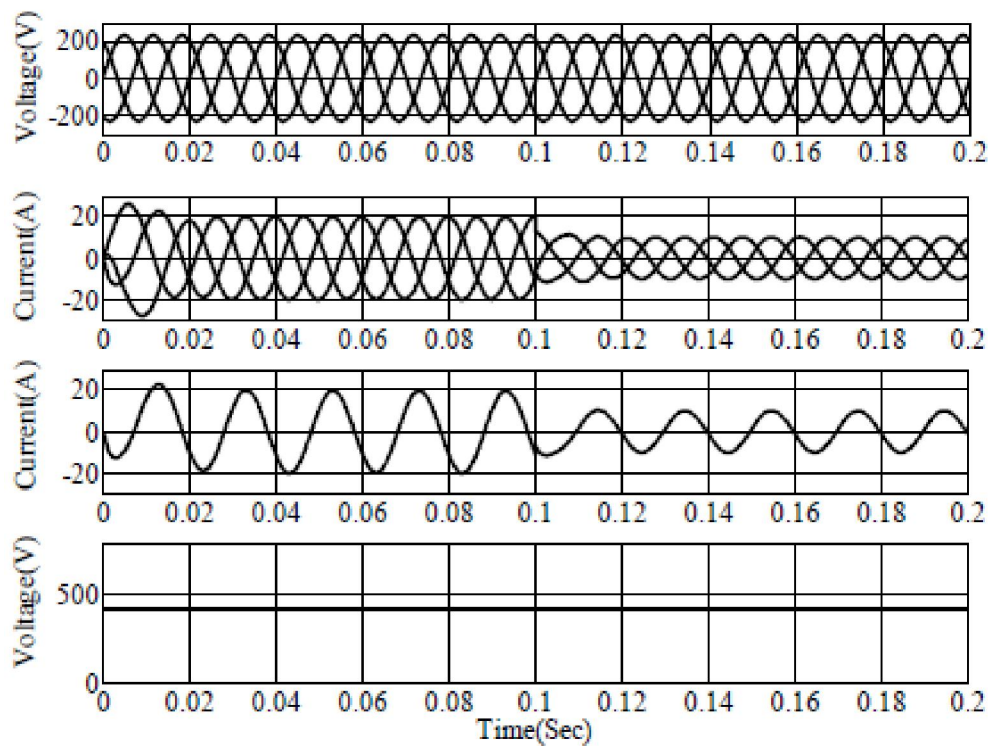


شکل ۴-۱۳ بلوک دیاگرام روش کنترل جریان *SVPWM* اعمال شده به اینورتر پیشنهاد شده در مرجع [۱۱]

پاسخ حالت پایدار ولتاژ شبکه در نقطه *PCC*، جریان شبکه و جریان فازی خروجی اینورتر برای کنترلر جریان *SVPWM* در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است. پاسخ حالت گذرا کنترل کننده جریان *SVPWM* در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی می توان مشاهده کرد که اعوجاج جریان شبکه و متناسب با آن *THD* جریان های شبکه در روش *SVPWM* کمتر از روش هیستریزیس می باشند. اما پاسخ دینامیکی روش کنترل جریان هیستریزیس به مراتب سریع تر از روش کنترل جریان *SVPWM* می باشد. طیف هارمونیک و *THD* جریان شبکه در دو روش کنترل کننده در شکل های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) نشان داده شده است.

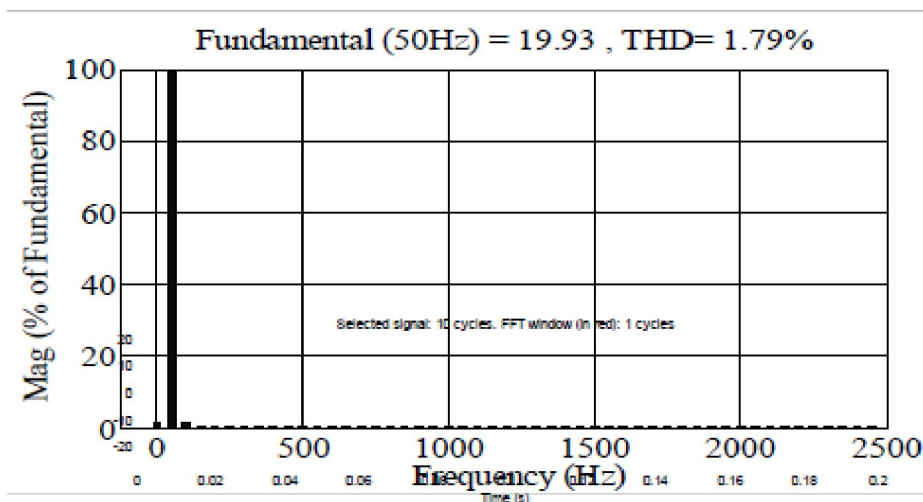


شکل ۴-۱۴. نتایج شبیه‌سازی حالت پایدار کنترلر جریان *SVPWM* *a*. ولتاژ شبکه در *PCC* *b* جریان شبکه *c*. جریان فاز خروجی اینورتر [۱۱]

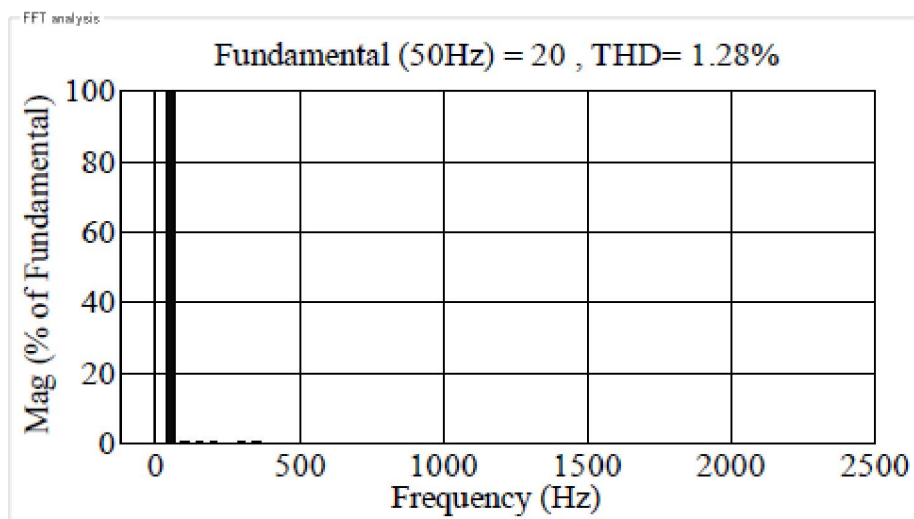


شکل ۴-۱۵. نتایج شبیه‌سازی حالت گذرا کنترلر جریان هیستریزس تطبیقی *a* ولتاژ شبکه در *PCC* *b*

جریان شبکه c . جریان فاز خروجی اینورتر d ولتاژ خط dc [۱۱]



شکل ۴-۱۶. THD جریان شبکه برای کنترلر جریان هیستریزس تطبیقی [۱۲]



شکل ۴-۱۷. THD جریان شبکه برای کنترلر جریان $SVPWM$ [۱۲]

۴-۷ خلاصه فصل:

در این فصل روش‌های مختلفی مانند $SVPWM$ و هیستریزس و PWM برای کنترل اینورتر بررسی شده است که هر کدام مشکلات خاص خود را دارند. در روش $SVPWM$ در بحث حفاظت، جریان بیش از حد ذاتی که مخصوصاً برای اینورترهای متصل به شبکه مطرح است دچار ضعف می‌باشد در روش هیستریزس، با تغییر پهنای باند می‌توان فرکانس سوئیچ زنی متوسط اینورتر متصل به

شبکه را کنترل کرد و عملکرد اینورتر را به ازای پهنای باندهای مختلف مورد ارزیابی قرار داد، از شاخص‌های این روش سادگی اجرا، پاسخ بسیار سریع حلقه جریان، پایداری مناسب و محدودسازی پیک جریان می‌باشد و از نقاط ضعف آن، تلفات سوئیچینگ بالا، فرکانس کلید زنی متغیر و افزایش فرکانس کلید زنی سوئیچینگ با توجه به باند هیستریزس زیاد است.

مدولاسیون PWM دارای مزیت‌هایی همچون پاسخ دینامیک سریع، حفاظت پیک جریان ذاتی، استفاده مطلوب از خط DC ، کنترل جریان لحظه‌ای نسبت به روش هیستریزس و $SVPWM$ می‌باشد. از دیگر مزیت‌هایی این روش می‌توان به فرکانس سوئیچینگ ثابت، نمونه‌های سوئیچ زنی بهینه، و طیف هارمونیک عالی اشاره کرد [۱۳].

فصل پنجم

استراتژی کنترلی اعمال شده بر

سیستم، مدل سازی شبکه و نتایج

شبیه سازی

۵-۱ مقدمه

امروزه استفاده از منابع مختلف انرژی به خصوص انرژی‌های پاک مانند انرژی بادی، خورشیدی و ... برای تأمین توان مورد نیاز بارهای متصل به شبکه، باعث افزایش استفاده روزافزون از مبدل‌های الکترونیک قدرت توان بالا و متوسط شده است و این امر پیشرفت‌های سریع و وسیع این مبدل‌ها را در دو دهه اخیر به همراه داشته است. یکی از مبدل‌های مورد استفاده در سیستم‌های قدرت مبدل‌های *B2B* می‌باشد که امروزه در بخش تولیدات پراکنده به خصوص منابع تولید پراکنده متصل به توربین‌های بادی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. امکان استفاده از این چنین مبدل‌های سریع و پر بازده در سیستم‌های قدرت پیچیده و بسیار حساس نیازمند مدارها کنترلی مناسب می‌باشد. از سوی دیگر این مدارهای کنترلی باید قابلیت بهبود شاخصه‌های مختلف را در هنگام وقوع خطا، داشته باشند. از این رو با استفاده از روش‌های کنترلی مختلف بر روی این مبدل‌های دارای سوئیچ‌های تمام کنترل شونده، می‌توان شرایط لازم برای اتصال این منابع به شبکه را فراهم نمود. از سوی دیگر در صورت مطالعه و مدل‌سازی‌های دقیق این دسته از مبدل‌های متصل به شبکه می‌توان روش‌های کنترلی تکامل‌یافته و بهبودیافته‌ای را در جهت رفع خطاهای احتمالی در شبکه بکار برد.

سیستم تولید پراکنده مورد مطالعه در این پایان‌نامه شامل توربین بادی با ژنراتور پر بازده *PMSG* می‌باشد. مدل در نظر گرفته‌شده برای ژنراتور سنکرون سیستم، از نوع ژنراتور سنکرون آهنربا دائم با اتصال سطحی آهنرباها می‌باشد. طبیعی است که در این نوع ماشین‌ها با توجه به برابر بودن تراوایی مغناطیسی هوا و آهنربای دائم، اندوکتانس‌های محورهای d و q باهم برابر می‌باشند. این موضوع طبیعتاً سبب کاهش پیچیدگی‌های حلقه کنترلی اینورتر قدرت و یکسوساز تمام کنترل شونده می‌شود. توان تولیدی ژنراتور سیستم از طریق یک یکسوساز تمام کنترل شونده منبع ولتاژی شش پالسه به لینک *DC* تزریق می‌شود. به منظور کاهش ریبیل و اعوجاج در ولتاژ خروجی یکسوساز از یک خازن استفاده شده است. پس از یکسوسازی ولتاژ، توان از طریق اینورتر قدرت با عبور از فیلتر پایین گذر به

شبکه تزریق می‌شود. در این مبدل مدار کنترلی با هدف تزریق بیشینه توان تولیدی توربین بادی برای آزادسازی بخشی از ظرفیت شبکه و همین طور تغذیه بار محلی با استفاده از روش مدولاسیون PWM بر روی هر دو مبدل سمت شبکه (اینورتر قدرت) و سمت $PMSG$ (یکسوساز تمام کنترل شونده منبع ولتاژی) صورت گرفته است. همچنین با کنترل توان راکتیو اینورتر، افت ولتاژ ناشی از خطای گذرا در نقطه PCC تا حد قابل قبولی بهبود بخشیده می‌شود.

۵-۲ مدل‌سازی اجزا و تشریح روش کنترلی

با توجه به شکل (۵-۱) توربین بادی با ژنراتور مغناطیس دائم توسط یکسوکندنده و اینورتر بعد از عبور از فیلتر پایین‌گذر در نقطه اتصال PCC به شبکه‌ای ضعیف متصل می‌باشد. این شبکه بار حساسی را در انتهای سیستم در نقطه اتصال مشترک تغذیه می‌کند. در اینجا منظور از شبکه‌های ضعیف، شبکه‌ای است که سطح ولتاژ همانند شبکه‌های سخت (یا قوی) ثابت نیست. شبکه‌های ضعیف معمولاً در نواحی دوردست یافت می‌شوند که سیستم‌های تغذیه بلند می‌باشد و هنگامی که بار طراحی شده بیش از حد مجاز باشد یا افت ولتاژ گذرا رخ دهد سطح ولتاژ در کمتر از کمینه مجاز خود قرار می‌گیرد. هدف از این مدل‌سازی، تزریق حداکثر توان توربین بادی به شبکه و تغذیه بار حساس با ثابت نگه‌داشتن ولتاژ لینک DC و در مرحله بعد بهبود افت ولتاژ در نقطه PCC (اتصال به شبکه) به هنگام وقوع خطای گذرا، با تزریق توان راکتیو می‌باشد. اتصال DG به سیستم توزیع می‌تواند کیفیت مناسب ولتاژ را فراهم سازد. تزریق توان اکتیو و راکتیو و سایر اهداف کنترلی طبق نمونه‌گیری و فیدبک از پارامترهای شبکه می‌باشد. مدارهای کنترلی از دو قسمت مجزا برای هر دو مبدل سمت ژنراتور و شبکه تشکیل شده است.

یکی از مزایای مهم مبدل‌های یکسوکننده PWM عدم نیاز به مبدل DC به DC در خروجی این نوع مبدل‌ها می‌باشد؛ که این امر باعث کاهش پیچیدگی‌های مسئله و افزایش راندمان سیستم می‌باشد. علاوه بر این در مبدل‌های یکسو ساز ترستوری نیز به علت کشیده شدن جریان دارای اعوجاج از منبع ورودی مسائل نگران‌کننده‌ای در مباحث کیفیت سیستم و مباحث هارمونیک در شبکه ایجاد می‌شود.

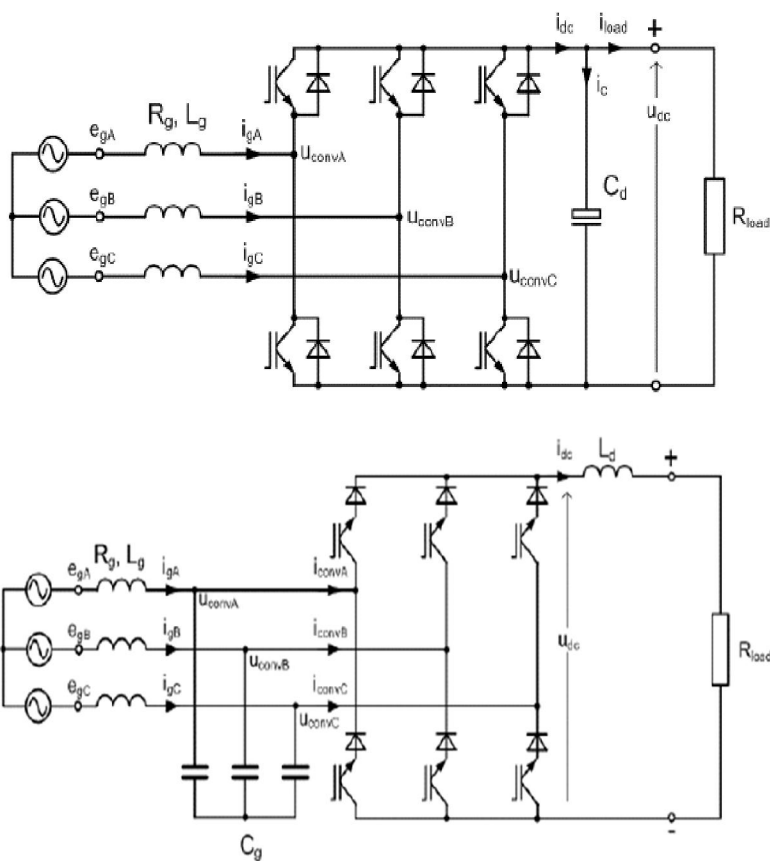
با توجه به توضیحات ارائه‌شده مبدل‌های یکسو ساز تمام کنترل شونده به علت کشیدن جریان کاملاً سینوسی از منبع ورودی، تنظیم ولتاژ خروجی بدون نیاز به مبدل DC به DC ، عدم به وجود آوردن توان راکتیو اعوجاجی در شبکه و اصلاح ضریب قدرت ورودی مبدل نسبت به سایر یکسو سازها برتری داشته و بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مبدل‌ها خود دارای انواع مختلفی از جمله ساختار ولتاژ-مرجع^۱ و جریان-مرجع^۲ می‌باشند که با توجه که به شرایط بهره‌برداری ساختار مناسب انتخاب می‌شود. شکل ۵-۲ ساختار این دو مبدل را نمایش می‌دهد.

در این پروژه بر روی مبدل نوع یکسو ساز ولتاژ مرجع با روش مدولاسیون پهنای باند^۳ تمرکز شده است. در این ساختار طراحی سیستم کنترلی بر اساس نمونه‌گیری ولتاژ دو سر خازن خروجی انجام می‌پذیرد. درحالی‌که در ساختار جریان مرجع طراحی سیستم کنترلی بر اساس نمونه‌گیری از جریان سلف خروجی انجام می‌شود.

^۱ Voltage Source

^۲ Current Source

^۳ Voltage Source PWM Rectifier



شکل ۵-۲- الف- ساختار مداری مبدل ولتاژ مرجع (Voltage Source)
 ب- ساختار مداری مبدل جریان مرجع (Current Source) [۱۳].

مبدل سمت ژنراتور دو هدف زیر را دنبال می‌کند:

- انتقال توان تولیدشده ژنراتور به لینک DC
- افزایش ضریب قدرت ژنراتور

با توجه به اهداف فوق برای مبدل سمت ژنراتور، معادلات ژنراتور $PMSG$ طبق [۱۵] در دستگاه

گردان dqo بررسی می‌شود که در آن معادلات به صورت رابطه (۵-۱) و به صورت تعمیم‌یافته طبق

معادله (۵-۲) می‌باشد. در این روابط R_s مقاومت سیم‌پیچ استاتور، v_{sd} ، v_{sq} ، i_{sd} و i_{sq} به ترتیب

ولتاژها و جریان‌های محورهای d و q استاتور و ψ_f شار تولیدی توسط آهنرباهای ژنراتور می‌باشند.

همچنین L_{ls} ، L_{dm} و L_{qm} به ترتیب اندوکتانس نشتی سیم‌پیچ استاتور و اندوکتانس‌های متقابل محور

d و q استاتور می‌باشند.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} \quad (۱-۵)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ld} + L_{dm} & 0 \\ 0 & L_{ld} + L_{qm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۲-۵)$$

با توجه به معادلات انتقالی ژنراتور به دستگاه گردان dqo ، رابطه بین گشتاور الکترومغناطیسی و جریان محورهای d و q استاتور طبق معادله (۳-۵) می‌باشد.

$$\tau_{em} = p (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) = p (\psi_f i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \quad (۳-۵)$$

در رابطه (۳-۵) $L_d = L_{ls} + L_{dm}$ و $L_q = L_{ls} + L_{qm}$ می‌باشد. در ماشین سنکرون آهنربا دائم که مورد استفاده در این شبیه‌سازی می‌باشد با اتصال سطحی آهنرباها اندوکتانس‌های محورهای عرضی و طولی تقریباً برابر بوده و بنابراین رابطه (۳-۵) به صورت رابطه (۴-۵) کاهش می‌یابد. در رابطه (۳-۵)، P نمایانگر تعداد جفت قطب‌های ژنراتور سنکرون است.

$$\tau_{em} = p \psi_f i_{sq} \quad (۴-۵)$$

در ژنراتورهای سنکرون رابطه بین توان و سرعت به صورت زیر است که در آن ω_m سرعت چرخشی روتور می‌باشد. اگر رابطه (۴-۵) در رابطه (۵-۵) قرار داده شود مشخص می‌شود که برای تولید توان ثابت از ژنراتور تنها مؤلفه‌هایی که متغیر هستند ω_m و i_{sq} می‌باشند. بنابراین برای کنترل توان اکتیو باید از پارامترهای ω_m و i_{sd} استفاده کرد.

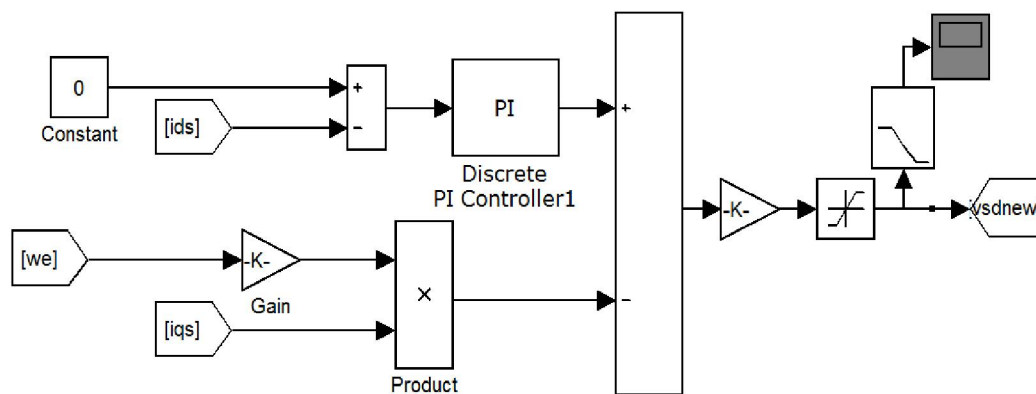
$$P = -\tau_{em} \omega_m \quad (۵-۵)$$

با توجه به مطالب ذکرشده، کنترل توان اکتیو به i_q و کنترل توان راکتیو به i_d بستگی دارد، بنابراین برای انتقال حداکثر توان تولیدشده ژنراتور به لینک DC و همین‌طور بهره‌برداری به صورت ضریب توان واحد، مدار کنترلی مبدل سمت ژنراتور، از دو حلقه کنترلی d و q تشکیل می‌شود.

استراتژی کنترلی سمت ژنراتور با استفاده از بازنویسی روابط (۱-۵) و (۲-۵) از روابط (۶-۵) بدست می‌آید. بخش‌هایی از این روابط که در پرانتز قرار دارند به معادلات حالت بین ولتاژ و جریان در حلقه‌های d و q مربوط می‌شود و بخش‌های دیگر به اثر متقابل دو محور بر روی همدیگر بستگی دارد.

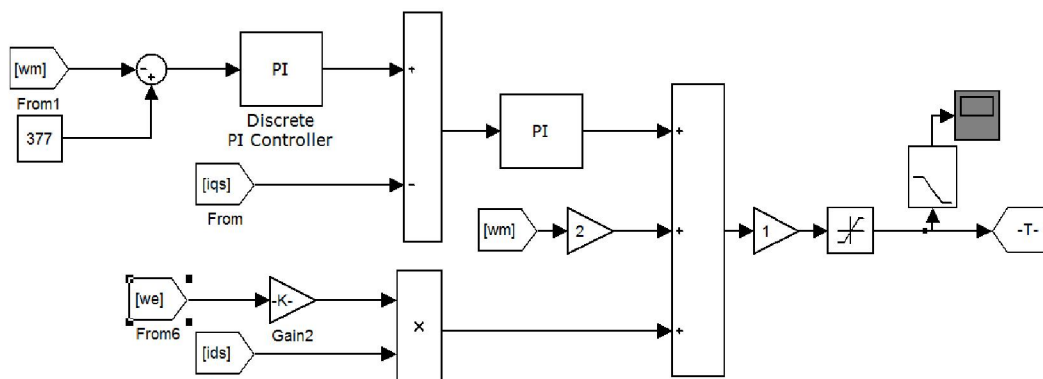
$$\begin{cases} v_{sd} = -(R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt}) - w_e l_q i_{sq} \\ v_{sq} = -(R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt}) + w_e l_d i_{sd} \end{cases} \quad (۶-۵)$$

همچنین در شکل‌های (۳-۵) و (۴-۵) نحوه پیاده‌سازی ساختار کنترلی نمایش داده شده است.



شکل ۳-۵. مدار کنترلی قسمت i_d استاتور

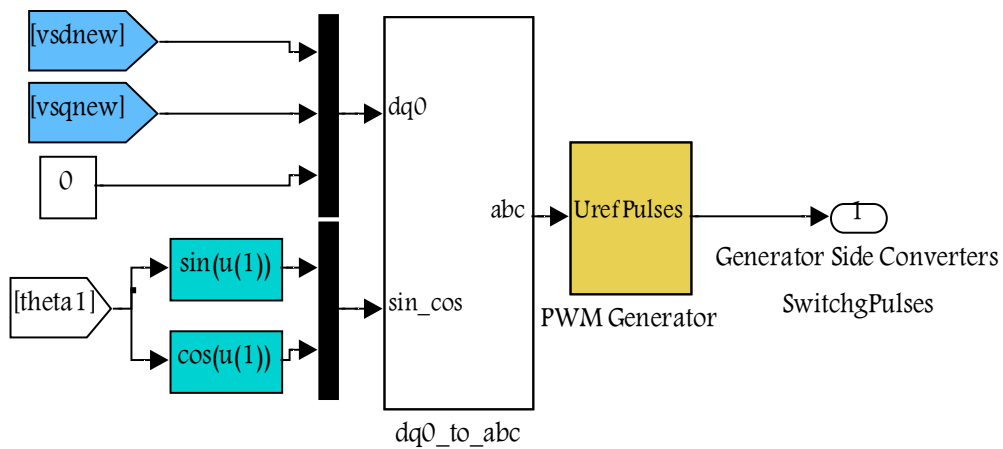
با توجه به شکل (۳-۵) مقدار i_d مرجع صفر قرار داده می‌شود تا توان راکتیو صفر شود و تنها توان اکتیو از ژنراتور کشیده شود. به عبارت دیگر ضریب قدرت ژنراتور برابر واحد شود. یکی از مزایای بهره‌برداری از DG ها در ضریب توان واحد این است که جریان کشیده شده از آن‌ها فقط جریان اکتیو است. بنابراین می‌توان قطر سیم‌پیچی‌های استاتور را کوچک‌تر گرفت که این کار سبب می‌شود DG ها از نظر حجم و وزن کوچک‌تر شوند که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.



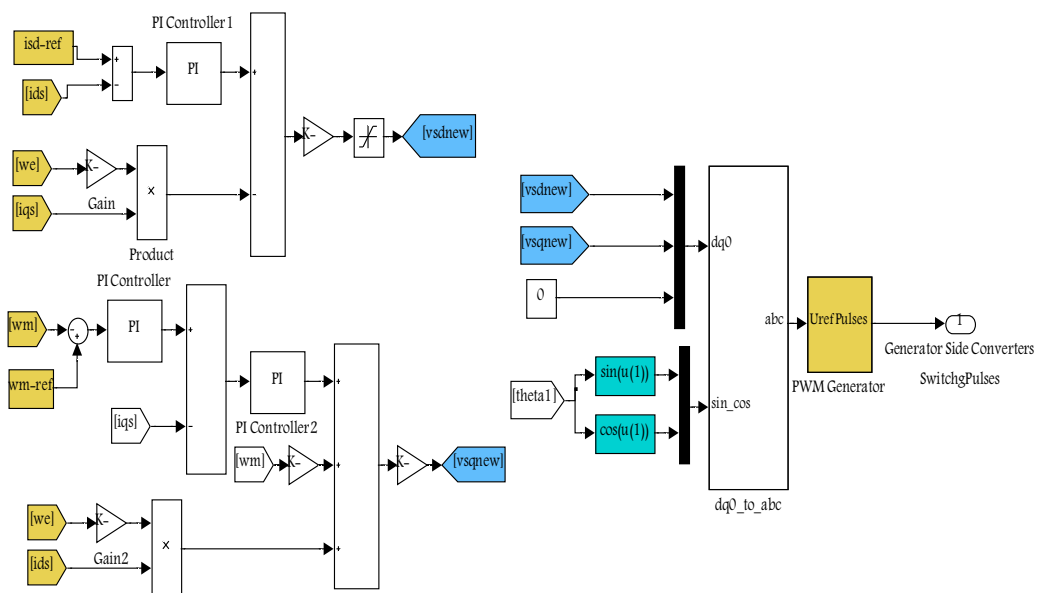
شکل ۴-۵. مدار کنترلی قسمت i_q استاتور

با توجه به مطالب گفته شده در قبل برای داشتن توان ثابت i_q و ω_m با یکدیگر در ارتباط هستند یعنی با تغییرات ω_m مقدار i_q نیز تغییر می کند. طبق شکل (۴-۵) مقدار جریان i_q مرجع از مقایسه سرعت نامی روتور و سرعت لحظه ای روتور (ω_m) بدست می آید. در واقع اختلاف سرعت روتور با سرعت مرجع بعد از عبور از کنترل کننده PI مقدار مرجع i_q را می سازد، این مقدار مرجع با مقدار i_q استاتور مقایسه و طبق معادله (۴-۵) با اثر متقابل محور d جمع می شود تا در نهایت v_q مربوط به استاتور را بسازد.

در نهایت مقادیر بدست آمده v_{sd} و v_{sq} طبق شکل (۵-۵) به فضای abc انتقال داده می شود تا به یک عدد ثابت که بین صفر و یک است قرار گیرد و سپس با مقایسه شکل موج حامل، سیگنال های لازم برای تزریق توان اکتیو و راکتیو دلخواه از سمت ژنراتور به کلیدها اعمال شود. در واقع رسیدن به اهداف کنترلی ذکر شده با کنترل ولتاژ بر روی محورهای d و q میسر شده است. در شکل (۴-۵) نیز شماتیک کلی مدار کنترلی مبدل سمت ژنراتور نشان داده شده است.



شکل ۵-۵. مدار مربوط به سوئیچینگ کلیدهای مبدل سمت ژنراتور



شکل ۵-۶. شما تیک کلی مدار کنترلی سمت توربین بادی و ژنراتور سنکرون

۵-۲-۲ مدل و کنترل مبدل سمت شبکه

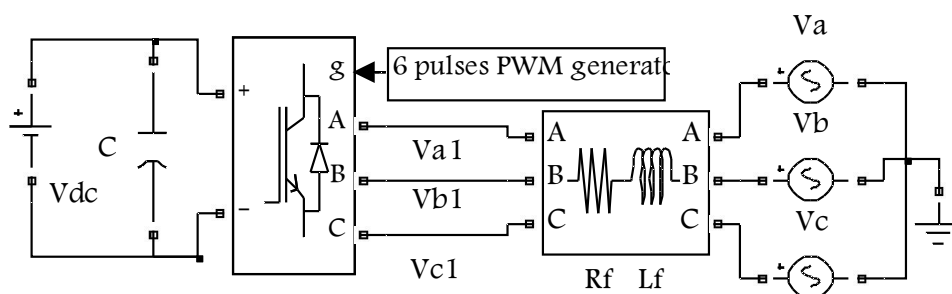
مدار کنترلی مبدل سمت شبکه دو وظیفه اصلی دارد:

- تزریق توان اکتیو به شبکه با ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک dc
- کنترل توان راکتیو و بهبود ولتاژ شبکه در لحظه تغییرات ولتاژ

استراتژی کنترل همانند مبدل سمت ژنراتور بر اساس محور قالب d و q می باشد. شما تیک کلی مبدل سمت شبکه در شکل (۷-۵) نشان داده شده است که در آن لینک dc در سمت چپ و منبع ولتاژ سه فاز قسمت ac (شبکه) در سمت راست می باشد که در نقطه pcc توسط اندوکتانس و مقاومت مربوط به فیلتر سمت شبکه به هم متصل می باشند. معادلات بین ولتاژ و جریان، در محور مرجع dq با توجه به فیلتر، ولتاژ سمت شبکه و ولتاژ سمت اینورتر طبق معادله (۶-۵) و به صورت تعمیم یافته طبق معادله (۷-۵) می باشد، که در آن فرکانس زاویه ای ولتاژ سمت شبکه و R_f و L_f به ترتیب مقاومت و اندوکتانس فیلتر سمت شبکه می باشد و v_d ، v_q ، v_{d1} ، v_{q1} به ترتیب پارامترهای ولتاژ در محور dq در نقطه pcc و خروجی اینورتر هستند. i_d ، i_q جریان محورهای dq بین شبکه سه فاز و اینورتر می باشد که در شکل (۷-۵) نشان شده است.

$$\begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_s L_f \begin{bmatrix} -i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (۷-۵)$$

$$\begin{cases} v_{d1} = R_f i_{gd} + L_f \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_s L_f i_{gq} + v_d \\ v_{q1} = R_f i_{gq} + L_f \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_s L_f i_{gd} + v_q \end{cases} \quad (۸-۵)$$



شکل ۷-۵. مدل فیلتر پایین گذر خروجی اینورتر قدرت

توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای انتقالی از اینورتر به سمت شبکه متناسب است با جریان محورهای dq شبکه که در معادلات (۷-۵) و (۸-۵) آورده شده است [۱۹،۲۰،۱۲،۱۵]. از آنجایی که ولتاژ شبکه در راستای محور q صفر فرض می‌شود، ملاحظه می‌شود که توان اکتیو در مبدل سمت شبکه با جریان محور d و توان راکتیو با جریان محور q در ارتباط است. با توجه به اینکه مبدل سمت شبکه باید بتواند ولتاژ لینک DC را در محدوده مجاز کارکرد مبدل حفظ کند؛ از طرفی ولتاژ لینک DC با توان حقیقی مبدل و به طبع آن با جریان محور d مبدل سمت شبکه رابطه مستقیمی دارد، بنابراین می‌توان از خروجی حلقه کنترل ولتاژ به عنوان مقدار مرجع جریان محور d استفاده کرد. به عبارت دیگر توان در لینک DC از حاصل ضرب ولتاژ در جریان این لینک حاصل می‌شود و با توجه به اینکه مبدل از نوع ولتاژ ثابت VSC می‌باشد لازم است تا ولتاژ لینک dc تثبیت گردد.

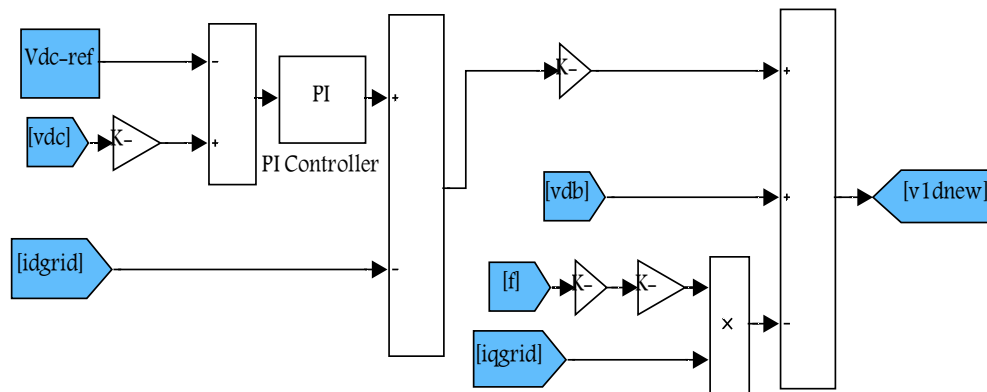
$$p(t) = v_d i_d + v_q i_q = v_d i_d \quad (۹-۵)$$

$$q(t) = v_q i_d - v_d i_q = -v_d i_q \quad (۱۰-۵)$$

در روش مورد استفاده برای مدار کنترلی اینورتر، همان طور که در شکل (۸-۵) آورده شده است محور d برای کنترل و ثابت نگه‌داشتن ولتاژ لینک DC و طبق معادله (۹-۵) برای تزریق توان

اکتیو و محور q ، طبق معادله (۵-۱۰) برای کنترل توان راکتیو و یا کنترل و بهبود وضعیت ولتاژ شبکه در نقطه PCC استفاده شده است.

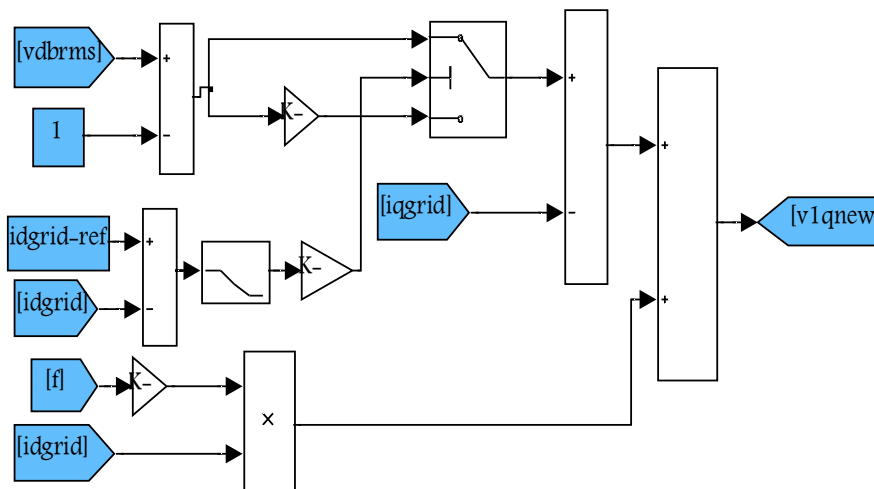
- در حلقه سمت d ، با توجه به شکل (۵-۸)، برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC و تزریق توان اکتیو، ولتاژ DC با مقدار مرجع مقایسه می شود و از یک کنترل کننده PI می گذرد تا خطای ولتاژ لینک DC صفر شود و خروجی آن مقدار جریان i_d مرجع را می سازد. این مرجع ساخته شده با جریان محور d شبکه مقایسه و از کنترل کننده PI می گذرد که در نهایت v_d را می سازد. سپس v_d با v_q شبکه (نقطه PCC) جمع می شود و طبق معادله (۵-۸) از اثر متقابل محور q کم می شود، و در نهایت v_{d1} را می سازد.



شکل ۵-۸. مربوط به مدار کنترلی محور d برای تزریق توان و ثابت نگه داشتن ولتاژ dc

- در حلقه سمت q ، با توجه به شکل (۵-۹)، کنترل توان راکتیو از سمت اینورتر بر عهده این محور می باشد تا با توجه به وضعیت افت ولتاژ ناشی از خطای گذرای سمت شبکه یا در مواقعی که در نقطه PCC دچار بالا زدگی می شود بتواند به اندازه ظرفیت سوئیچ های اینورتر طبق معادله (۵-۵)، جریان و به تبع آن توان راکتیو برای بهبود وضعیت ولتاژ به نقطه اتصال مشترک تزریق کند و یا از تولید توان راکتیو تزریقی بکاهد. در تشریح این حلقه، طبق نمونه گیری های انجام شده، ولتاژ نقطه PCC با مقدار مرجع مقایسه و از یک کنترل کننده PI می گذرد و i_q مرجع را می سازد این مقدار i_q

مرجع با مقدار i_q شبکه مقایسه و مجدداً از یک کنترل کننده PI می‌گذرد و طبق معادله (۵-۸) با اثر متقابل محور d جمع و در نهایت v_{q1} خروجی مدار کنترلی اینورتر را می‌سازد.

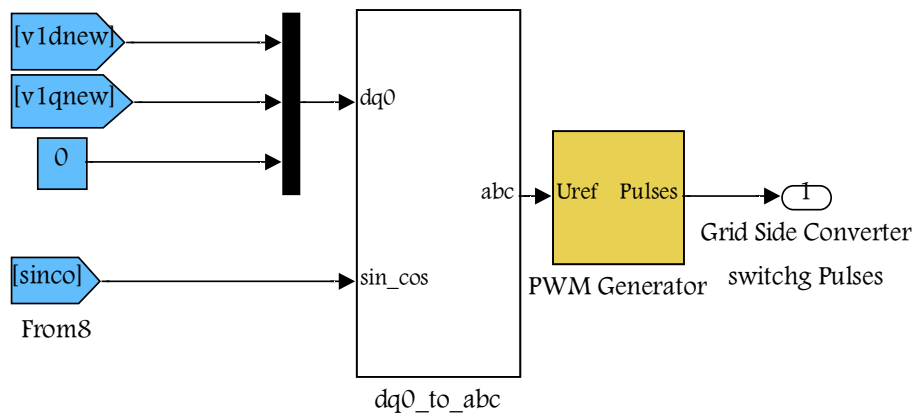


شکل ۵-۹. شماتیک مدار کنترلی محور q برای تزریق توان راکتیو

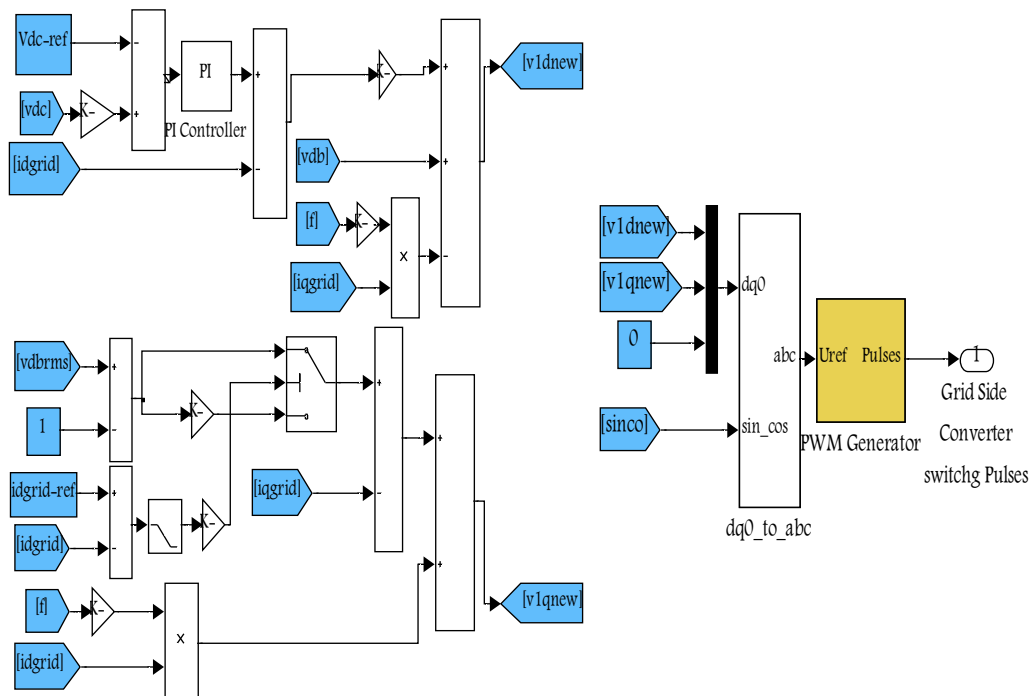
لازم به ذکر است که ساختن i_q مرجع بسیار مهم می‌باشد. استراتژی‌های مختلفی برای ساختن i_q مرجع وجود دارد مثلاً هم می‌توان توان راکتیو شبکه را با مقدار توان راکتیو مرجع مقایسه کرد و هم ولتاژ شبکه را با ولتاژ مرجع مقایسه کرد که در این پایان‌نامه از روش مقایسه ولتاژ استفاده شده است. با توجه به محدود بودن ظرفیت مبدل‌ها از یک محدودکننده با مقدار مشخص‌شده‌ای در حد توان مبدل DG استفاده شده است تا جریانی بیش از حد تعیین‌شده تزریق نکند که باعث سوختن مبدل (سوئیچ‌ها) یا ناپایداری شبکه شود. به همین خاطر اینورتر قادر به جبران کل افت ولتاژ ناشی از خطای گذرا نیست.

در نهایت مقادیر بدست آمده v_{d1} و v_{q1} طبق شکل (۵-۱۰) به فضای abc برده می‌شود تا به یک عدد ثابت که بین صفر و یک قرار گیرد و سپس با مقایسه شکل موج حامل، سیگنال‌های لازم برای تزریق توان اکتیو و راکتیو دلخواه از سمت ژنراتور به کلیدها اعمال شود. در واقع رسیدن به اهداف کنترلی ذکرشده، با کنترل ولتاژ بر روی محورهای d و q میسر شده است. در شکل (۵-۱۰)

شما تیک کلی مدار کنترلی مبدل سمت اینورتر نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰. مدار مربوط به سوئیچینگ کلیدهای مبدل سمت اینورتر و شبکه

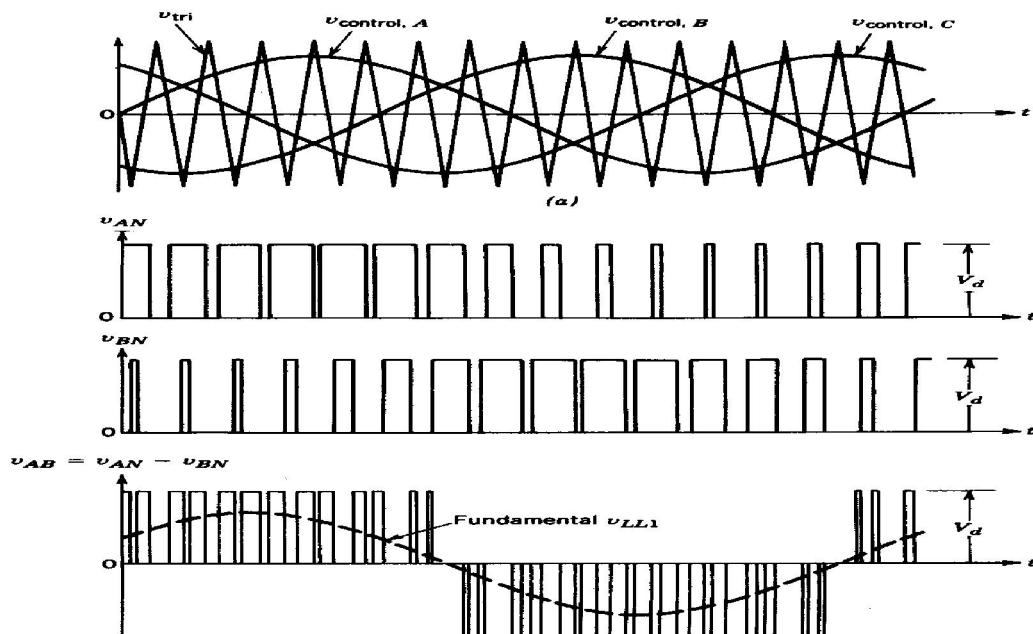


شکل ۵-۱۱. مربوط به شما تیک کلی مدار کنترلی اینورتر سمت شبکه

۵-۳ روش مدولاسیون بکار گرفته شده

در شبیه‌سازی‌های این فصل روش مدولاسیون بکار گرفته شده برای اعمال فرمان به سوئیچ‌های قدرت از نوع مدولاسیون PWM می‌باشد. در این روش که به $SPWM$ معروف است به کمک کلید زنی سریع سیگنال AC مرجع ورودی به فرکانس‌های بالا مدوله می‌شود و عملاً هارمونیک‌های غیر مهم را دور می‌کند، لذا به کمک فیلتر می‌توان هارمونیک‌های دور را فیلتر کرد که در نتیجه THD و هارمونیک‌های درجه پایین‌تر به نحو قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌گردند.

روش مدولاسیون به این نحو است که یک موج مثلثی با فرکانس حامل که همان فرکانس سوئیچینگ است، برای تلاقی با سیگنال‌های سینوسی مرجع سه فاز ساخته می‌شود. سپس برای هر فاز اگر دامنه‌ی موج مثلثی از موج مرجع آن فاز کمتر بود سوئیچ بالای مربوط به همان فاز روشن می‌شود، و چنانچه مقدارش بیشتر بود سوئیچ پایینی روشن می‌گردد. به این طریق موج سینوسی ورودی حدود ۵۰ هرتز به موج مدوله شده‌ی به فرکانس حامل انتقال می‌یابد. شکل ۵-۱۱ نحوه‌ی کلید زنی و شکل موج ولتاژ خط را نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۱۲. مدولاسیون پهنای پالس [۱۱]

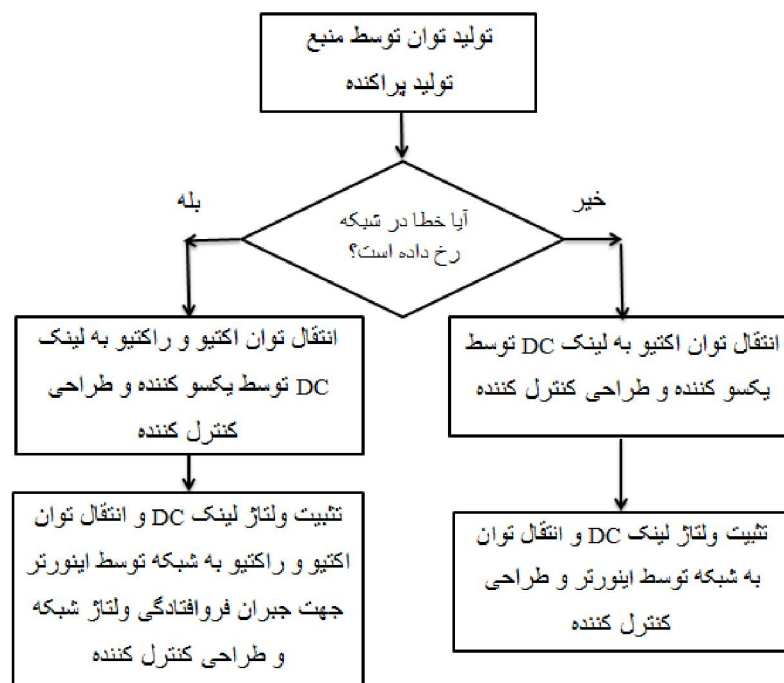
مزایای روش $SPWM$:

- ۱- THD پایین
- ۲- دور بودن هارمونیک‌های غیرمفید و اضافی
- ۳- امکان فیلتر کردن ساده و آسان جهت حذف هارمونیک‌های اضافی
- ۴- امکان پیاده‌سازی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری راحت
- ۵- رفتار دینامیکی نسبتاً سریع برای کاربردهایی مثل درایو

معایب روش $SPWM$:

- ۱- کم بودن دامنه‌ی پیک فاز خروجی
- ۲- چون تلفات کلید زنی رابطه‌ی مستقیم با فرکانس کلید زنی دارد لذا در فرکانس بالا تلفات به شدت افزایش میابد لذا بازده بسیار خوبی نمی‌توان انتظار داشت.

۴-۵ فلوچارت سیستم کنترلی



۵-۵ شبیه‌سازی و ارائه نتایج

به منظور تأیید کارایی روش کنترلی پیشنهادی، مطالب گفته‌شده در بخش‌های قبل بر روی یک سیستم تست نمونه شبیه‌سازی شده است. اطلاعات مربوط به این شبکه و سایر پارامترهای کنترلی که

در این شبیه‌سازی استفاده شده است در جدول (۵-۱) و (۵-۲) آورده شده است [۱۵]. همچنین مدار شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزاری *MATLAB/Simulink* در شکل ۵-۱ نمایش داده شده است.

در این فصل بررسی به گونه‌ای انجام و شبیه‌سازی می‌شود که GD در نقطه PCC به شبکه‌ای ضعیف متصل است. همان طور که در قبل بیان شده است، وظیفه اصلی مبدل‌ها تزریق حداکثر توان DG به شبکه با ثابت نگه‌داشتن ولتاژ لینک DC برای تغذیه بار محلی که آزادسازی بخشی از توان شبکه را منجر می‌شود و همین طور کنترل توان راکتیو در لحظه خطا یا سایر شرایطی که ممکن است ولتاژ را تحت تأثیر قرار دهد، است این امر با توجه به ظرفیت تولید پراکنده و ظرفیت مبدل‌ها انجام می‌شود. داده‌های مربوط به پارامترهای ژنراتور و شبکه به ترتیب در جدول‌های (۵-۱) و (۵-۲) آورده شده است [۱۳].

جدول ۵-۱- پارامترهای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>generator rated power (S_G)</i>	3500	kVA
<i>frequency (f)</i>	50	Hz
<i>generator rated voltage (V_G)</i>	380	V
<i>stator resistance (R_s)</i>	0.00033	Actual
<i>stator leakage inductance (L_{ls})</i>	0.0025	Actual
<i>Mutual inductance in d-axis (L_{dm})</i>	1.575e-4	Actual
<i>Mutual inductance in q-axis (L_{qm})</i>	1.75e-4	Actual
<i>dc-link capacitor C</i>	60000	μF
<i>grid-filter resistance (R_f)</i>	0.0012	Ω
<i>grid-filter inductance (L_f)</i>	0.5	mH

<i>Switching Frequency (f_s)</i>	<i>1810</i>	<i>Hz</i>
---	-------------	-----------

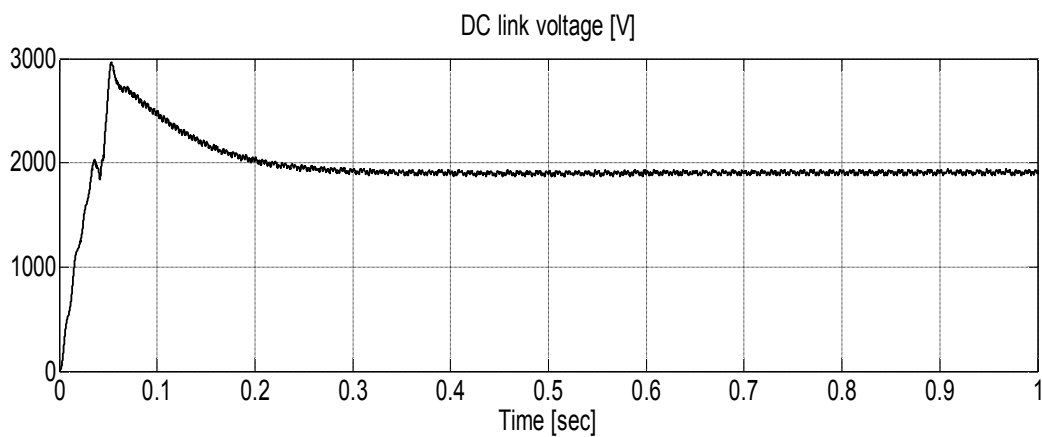
جدول ۵-۲- اطلاعات و داده‌های مربوط به شبکه شبیه‌سازی شده

<i>Parameter</i>	<i>Value</i>
V_s	3800 V
R_s	0.8929 Ω
L_s	16.58 mH
P_{Load}	1 MVA

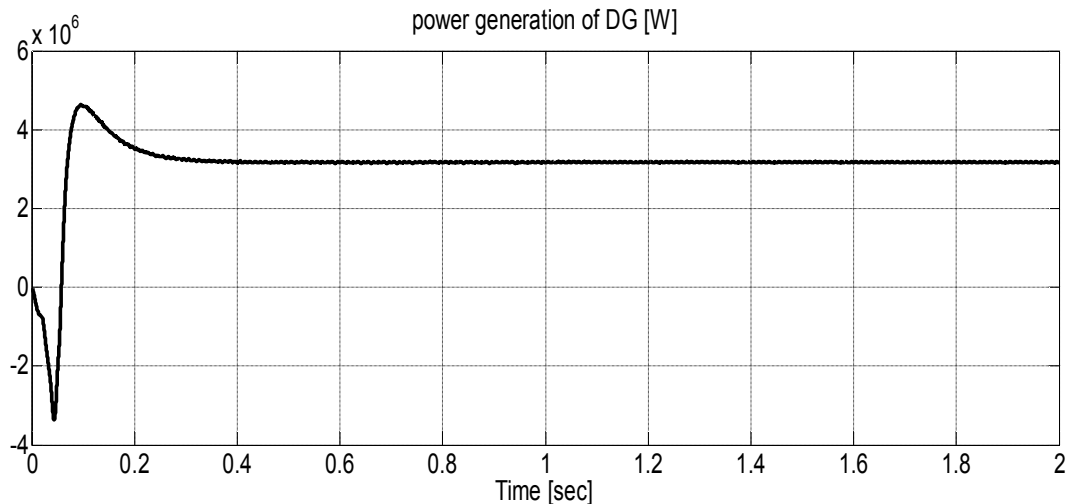
۵-۵-۱- شبیه‌سازی سیستم معرفی شده در شرایط کار عادی

به منظور بررسی و صحت مدلسازی‌ها و طراحی‌های صورت گرفته در این بخش ابتدا شبیه‌سازی طرح معرفی شده در شرایط کارعادی ارائه می‌شود. هدف از ارائه نتایج در این بخش تایید روند طراحی‌های معرفی شده در این پایان نامه می‌باشد. از اینرو در ابتدا و در حالت عادی فرض می‌شود که باری در نقطه PCC متصل نبوده و DG تمام توان اکتیو و راکتیو تولیدی خود را طبق مقادیر جدول (۵-۱) برای آزادسازی بخشی از ظرفیت شبکه به سمت شبکه، انتقال می‌دهد. در اینصورت شکل‌های (۵-۱۳)، (۵-۱۴) و (۵-۱۵) به ترتیب ولتاژ لینک DC ، توان اکتیو تزریقی به شبکه و توان راکتیو تزریقی به شبکه را نمایش می‌دهند. همچنین در این شرایط شکل (۵-۱۶) نیز جریان تزریقی DG به شبکه را نمایش می‌دهد. در مرحله بعد در زمان معادل با $t=0/5$ ثانیه خطایی گذرا ناشی از اتصال کوتاه رخ می‌دهد که باعث افت ولتاژ در نقطه اتصال طبق شکل (۵-۱۷) می‌شود. البته توضیح این نکته ضروری است که این شکل با فرض عدم حضور DG نمایش داده شده است. با توجه به این شکل در صورت نبود DG افت ولتاژ شدیدی در نقطه اتصال کوتاه رخ می‌دهد. حال با فرض وجود DG در نقطه

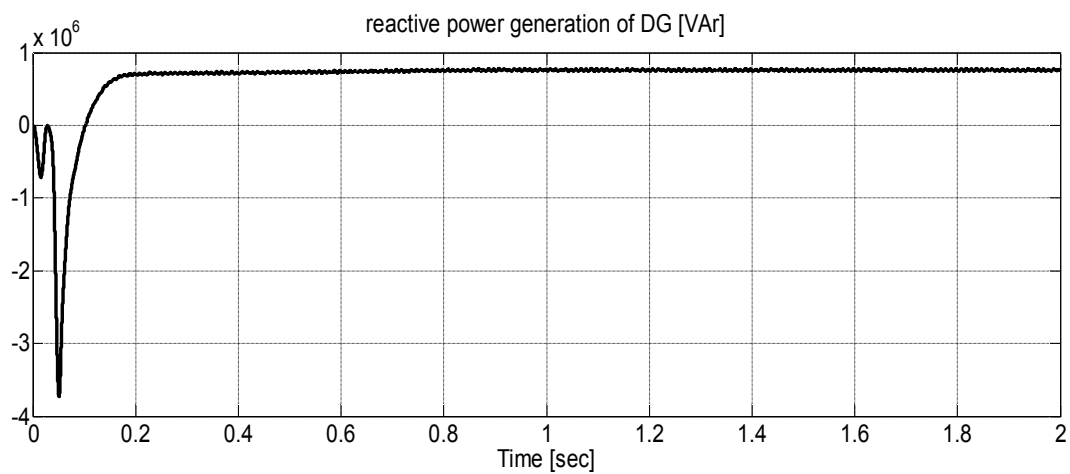
PCC ، با توجه به مدار کنترلی مبدل سمت شبکه که وظیفه تزریق توان راکتیو از محور q را بر عهده داشته است مقدار جریان و در نهایت توان راکتیو تزریقی از سمت DG به شبکه طبق اشکال (۵-۱۸) و (۵-۱۹) می‌باشد. در نهایت مقدار ولتاژ در نقطه PCC با حضور DG در حالت متصل به شبکه به صورت شکل (۵-۲۰) جبران می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به محدود بودن ظرفیت، DG قادر به بهبود کل افت ولتاژ ناشی از اتصال کوتاه نمی‌باشد و بخشی از اتصال کوتاه توسط شبکه جبران می‌شود.



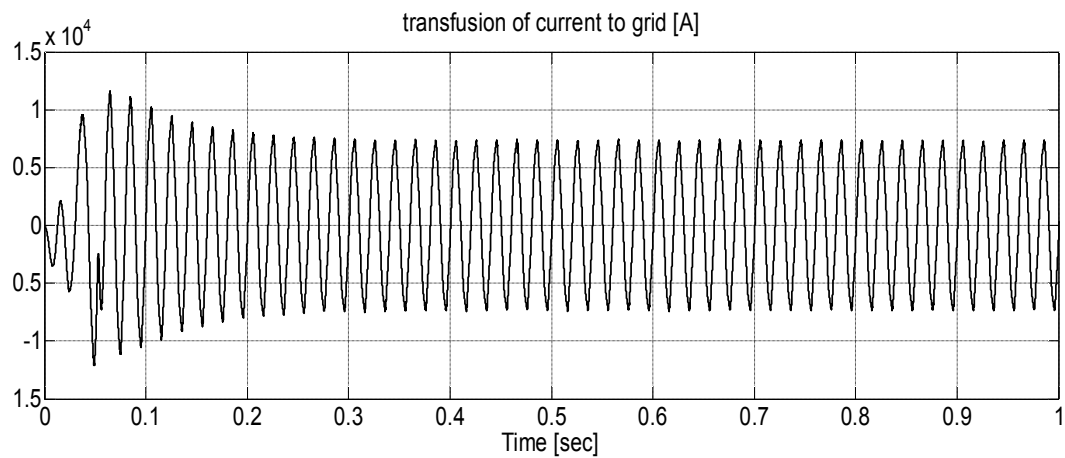
شکل ۵-۱۳. ولتاژ لینک DC ، در شرایط عملکرد نرمال



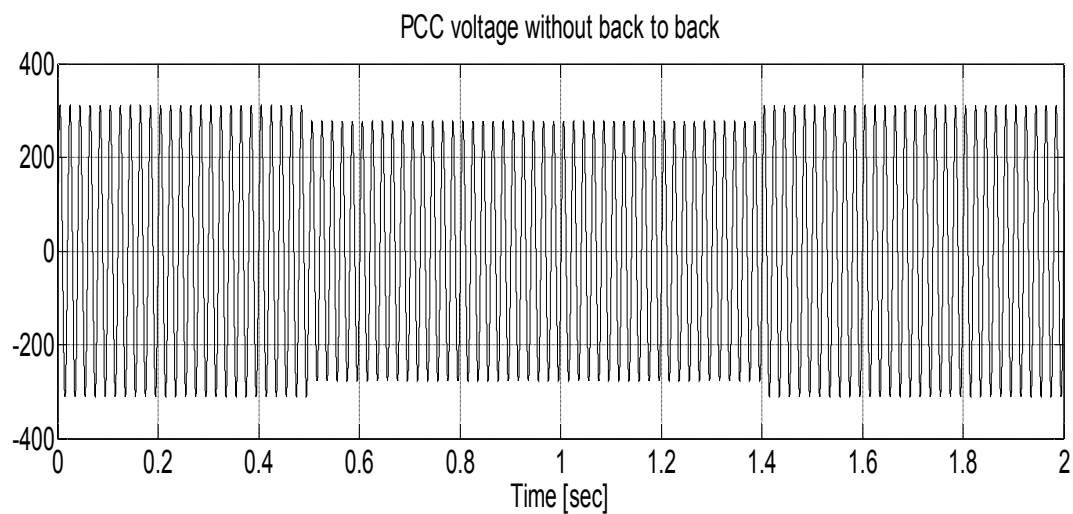
شکل ۵-۱۴. توان تزریقی DG به شبکه در شرایط عملکرد نرمال



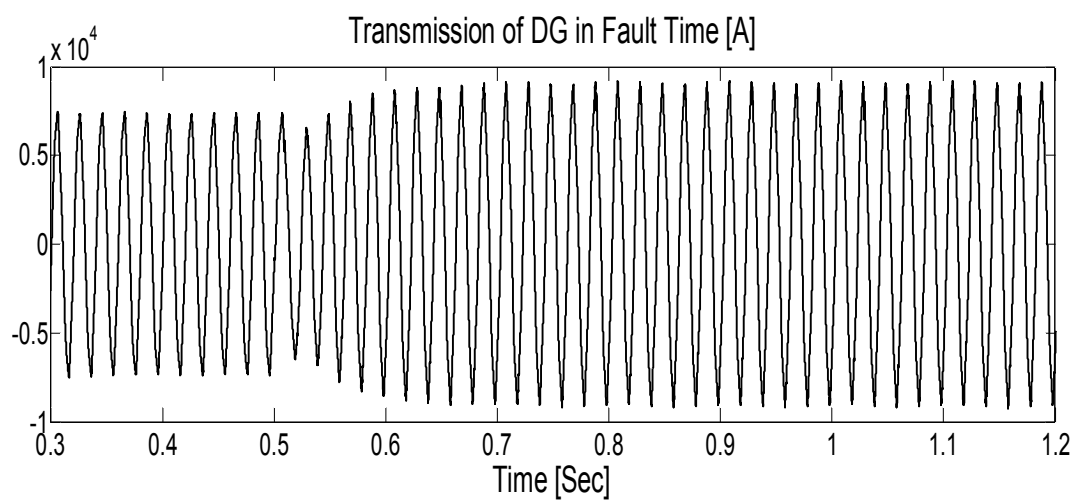
شکل ۵-۱۵. توان تزریقی DG به شبکه در شرایط عملکرد نرمال



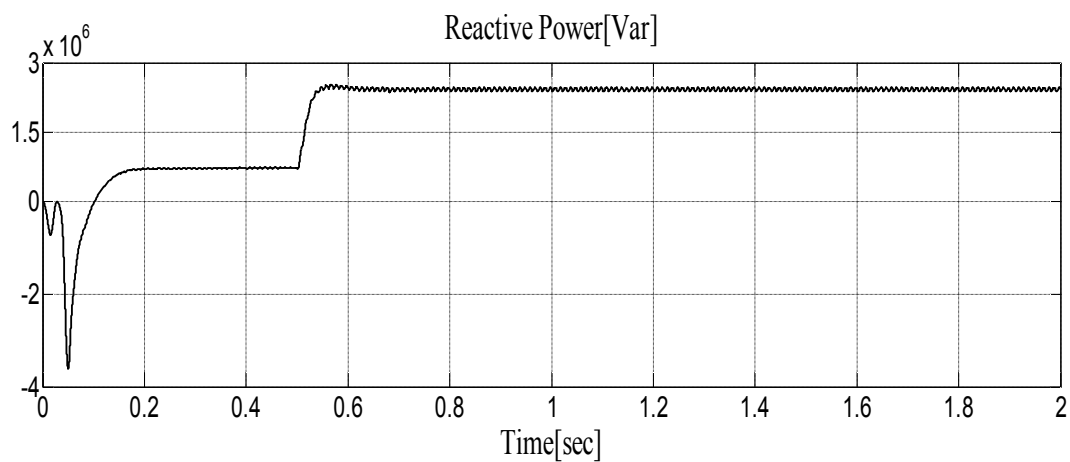
شکل ۵-۱۶. جریان تزریقی DG به شبکه در شرایط عملکرد نرمال



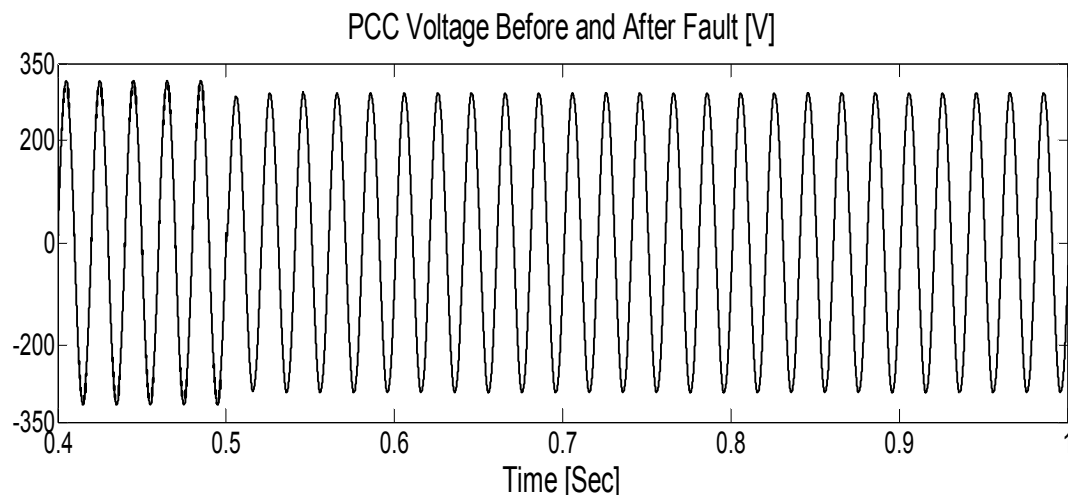
شکل ۵-۱۷. ولتاژ در نقطه PCC با وجود خطا و بدون حضور DG



شکل ۵-۱۸. افزایش جریان از سوی DG در زمان رخداد خطا



شکل ۵-۱۹. افزایش توان راکتیو تزریقی از سوی DG در زمان رخداد خطا



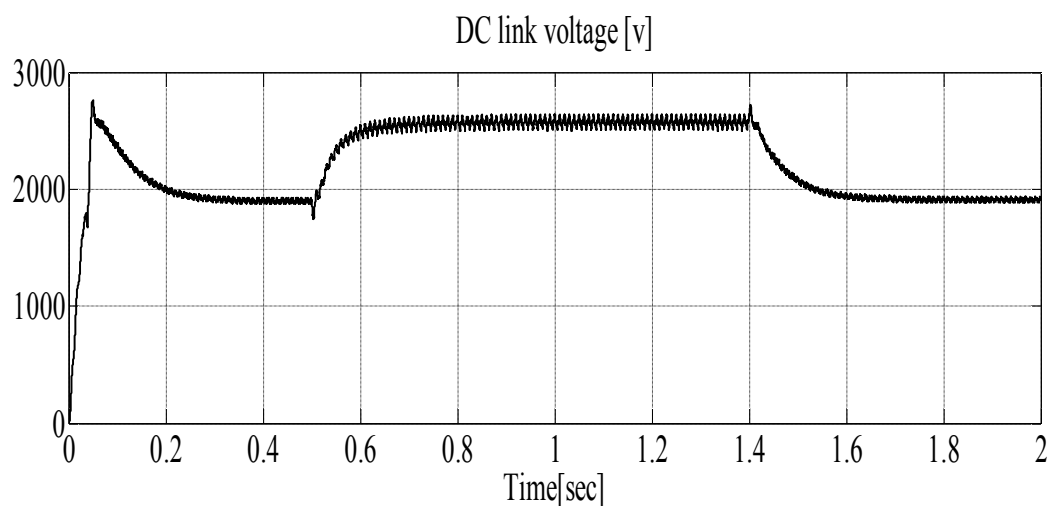
شکل ۵-۲۰. ولتاژ نقطه PCC قبل و بعد از رخداد خطا با حضور DG

۵-۵-۲- شبیه‌سازی سیستم معرفی شده در شرایط خطا

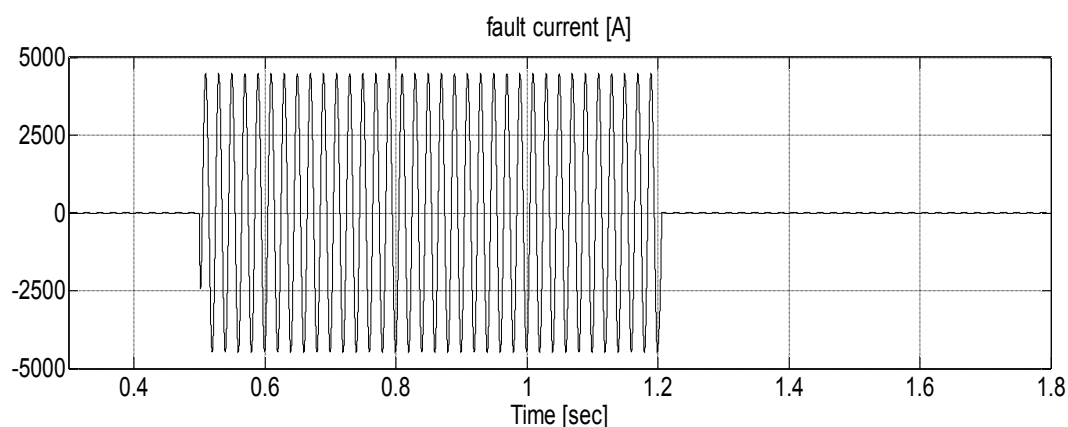
در این قسمت فرض بر این است که باری با توان یک مگا ولت‌آمپر در نقطه مشترک متصل می‌باشد و DG در حالت عادی طبق مقادیر جدول (۵-۱) و شکل (۵-۱۴) مقدار $3/5$ مگاوات توان به PCC تزریق می‌کند و با توجه به ظرفیت بار مقدار یک مگا ولت‌آمپر مصرف و مقدار $2/5$ مگا ولت‌آمپر برای آزادسازی ظرفیت شبکه به سمت شبکه انتقال پیدا می‌کند، که مقادیر ولتاژ لینک DC، جریان خطا، جریان و ولتاژ در PCC، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه و THD مربوط به ولتاژ با توجه به مقادیر جدول (۵-۱) به ترتیب طبق شکل‌های (۵-۲۱) تا (۵-۲۸) می‌باشد.

در زمان معادل با $t=0/5$ ثانیه تا $t=1/2$ ثانیه خطایی ناشی از اتصال کوتاه در نقطه PCC رخ می‌دهد، که مقدار ولتاژ در نقطه PCC را بیش از 14% کاهش می‌دهد، در این لحظه طی نمونه‌گیری‌های انجام شده در PCC مقدار جریان تزریقی به شبکه مطابق شکل (۵-۲۳) افزایش پیدا می‌کند و به تبع آن مقدار توان راکتیو تزریقی اینورتر طبق شکل (۵-۲۶) برای بهبود افت ولتاژ به اندازه 300 kVar افزایش پیدا می‌کند و مقدار ولتاژ در PCC را مطابق شکل (۵-۲۴) به اندازه 7% بهبود می‌بخشد. همچنین شکل (۵-۲۲) جریان مربوط به اتصال کوتاه را حین خطا نشان می‌دهد که برابر $4/7\text{ kA}$ می‌باشد. از آنجایی که در شبکه مورد مطالعه مبدل‌های الکترونیک قدرت که از تولیدکننده‌های هارمونیک

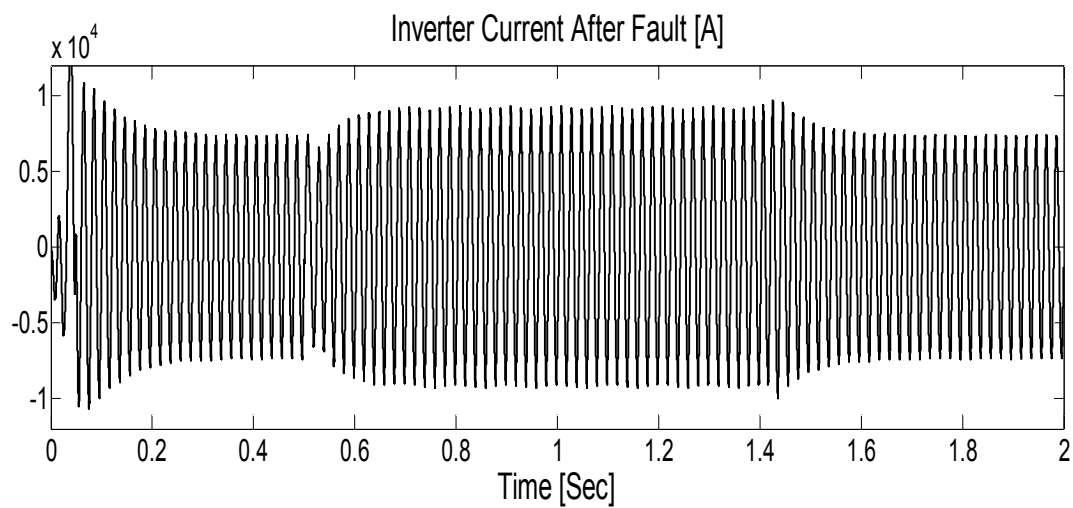
هستند وجود دارد لازم است هارمونیک‌های موجود در نقطه PCC که یکی از پارامترهای مهم کیفیت توان است مورد بررسی قرار گیرد. شکل (۲۷-۵) و مقدار THD ولتاژ در نقطه PCC، در لحظه قبل و بعد از رخ دادن خطا را نشان می‌دهد. به دلیل محدود بودن ظرفیت DG و مبدل، محدودیتی برای حداکثر جریان تزریقی از سمت اینورترتر لحاظ شده است. به همین خاطر قادر به تزریق جریان بیشتری نمی‌باشد و برای اینکه بتواند مقدار افت ولتاژ را کاملاً بهبود بخشد در قسمت DG طبق [۱۵] پیشنهاد می‌گردد از مزرعه بادی برای بالا بردن سطح اتصال کوتاه استفاده شود.



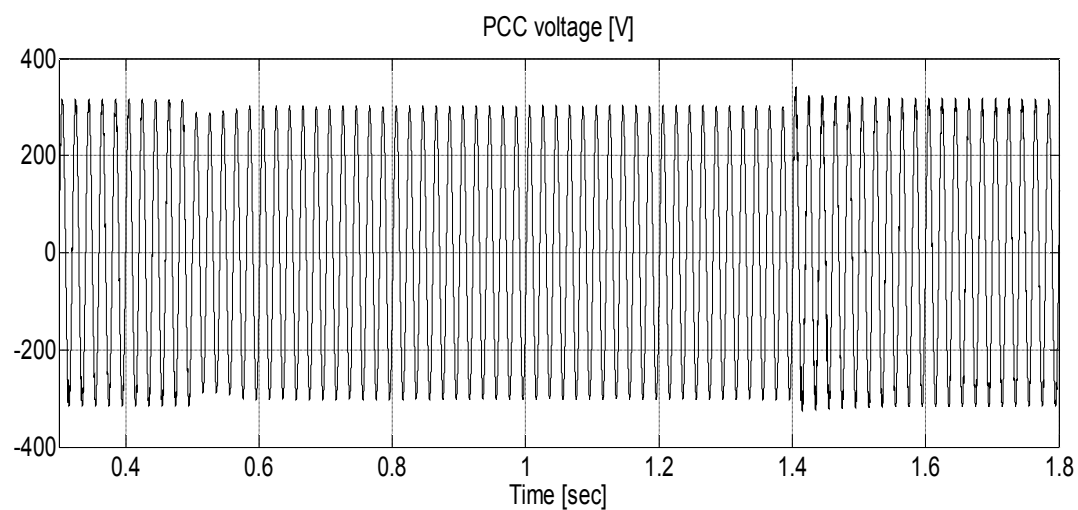
شکل ۵-۲۱. تغییرات ولتاژ لینک DC در زمان خطا و پس از رفع آن



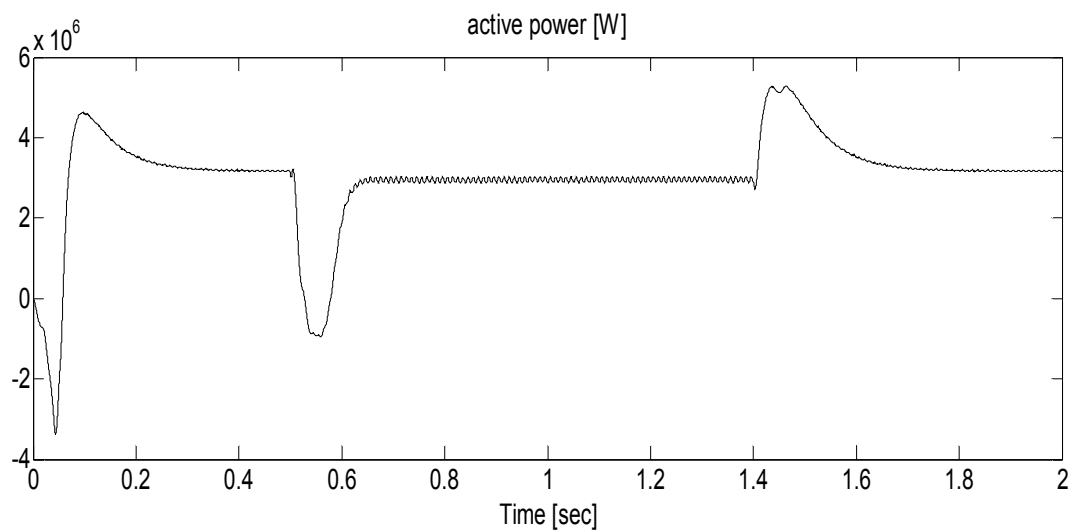
شکل ۵-۲۲. مقدار جریان خطا در زمان خطا و پس از رفع آن



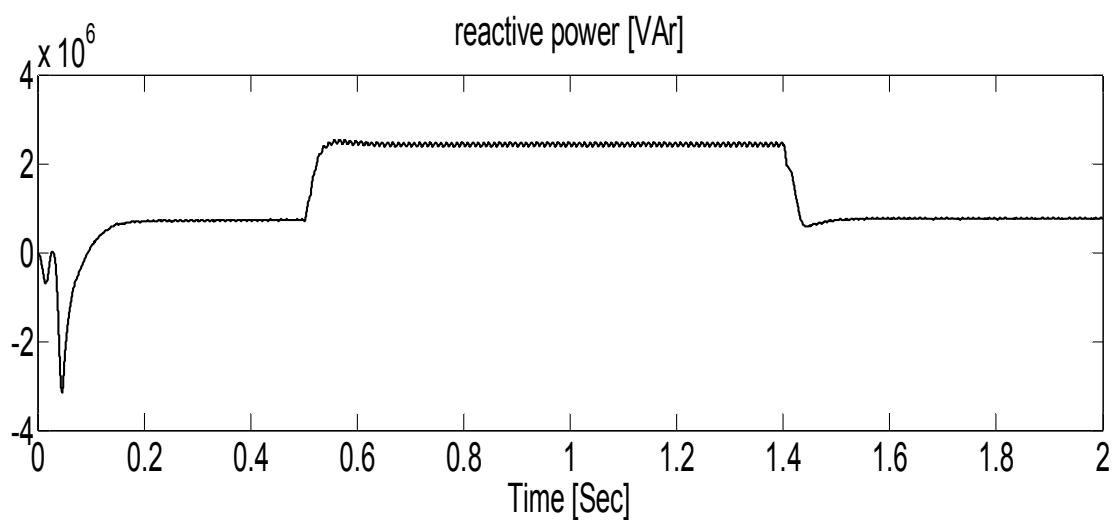
شکل ۵-۲۳. مقدار جریان تزریقی اینورتر در زمان خطا و پس از رفع آن



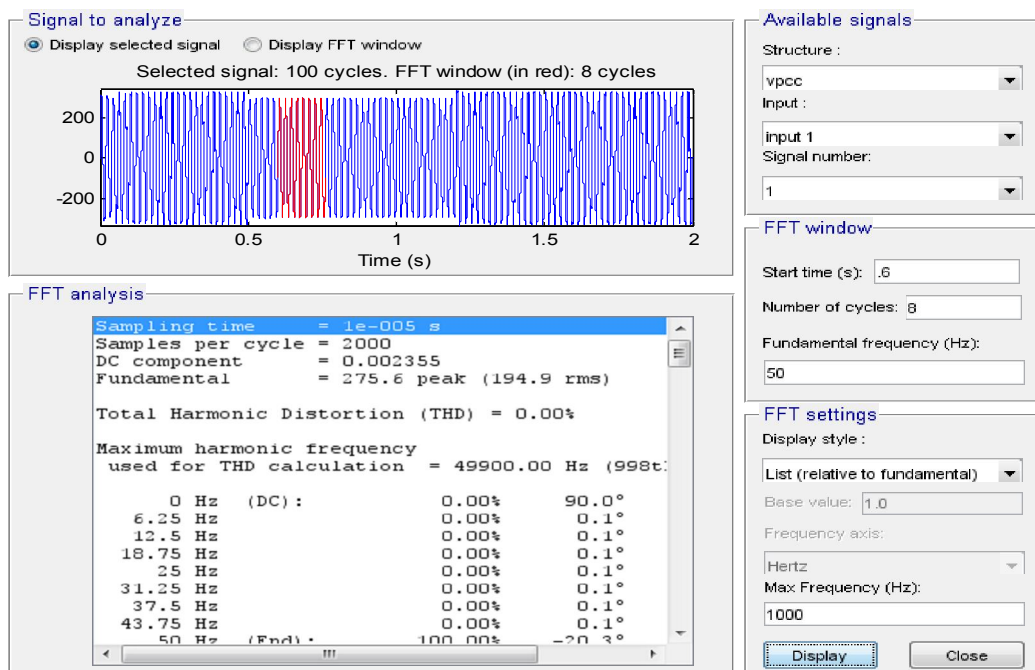
شکل ۵-۲۴. مقدار بهبود ۷٪ ولتاژ در نقطه pcc با وجود خطا در لحظه $t=0.5$ s



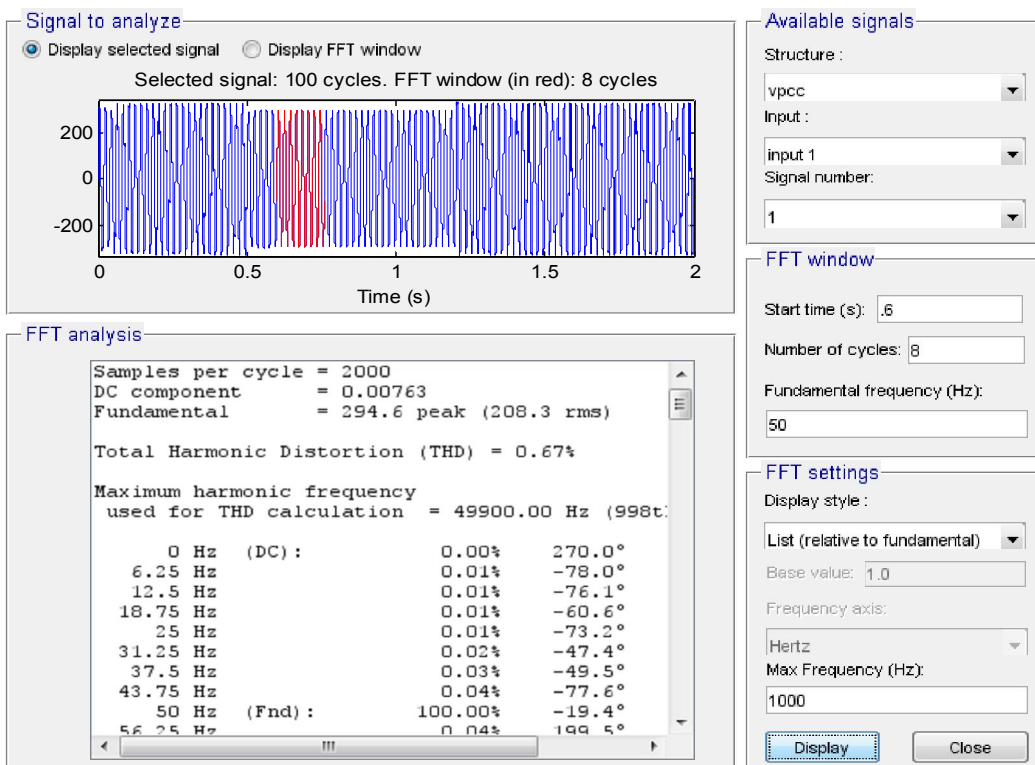
شکل ۵-۲۵. مقدار تغییرات توان اکتیو تزریقی اینورتر با جود خطا در لحظه $t=0/5$ s



شکل ۵-۲۶. مقدار تغییرات توان راکتیو تزریقی اینورتر با جود خطا در لحظه $t=0/5$ s



شکل ۵-۲۷. مقدار THD ولتاژ در نقطه pcc با وجود خطا در $t=0.5s$ و بدون حضور DG با مقدار پیک ولتاژ ۲۷۵ در لحظه خطا



شکل ۵-۲۸. مقدار THD ولتاژ در نقطه PCC با وجود خطا در $t=0.5s$ و با حضور DG با مقدار پیک ولتاژ ۲۹۵ در لحظه خطا

۵-۶ خلاصه فصل

در این فصل از گزارش مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌هایی در زمینه مبدل‌های الکترونیک قدرت متصل به توربین‌های بادی و شبکه قدرت ارائه شد. در ابتدای این فصل با توجه به معادلات و توضیحات ارائه شده و براساس ملزومات مورد نظر در بحث پایداری سیستم در هنگام خطا، روش و حلقه کنترلی مبدل‌های بکار رفته شده در این مدل‌سازی معرفی شد. به بیانی دیگر، در این فصل علاوه بر تشریح وظایف مربوط به مبدل‌های سمت DG و شبکه، روابط و معادلات مربوط به کنترل مبدل‌ها نیز آورده شده است. سپس با استفاده از این روابط که در قاب مرجع dq نوشته شده است روش کنترلی بر اساس مدولاسیون پهنای باند PWM و کنترل ولتاژی برای هر کدام از این مبدل‌ها تشریح شده است، در نهایت برای اثبات کارایی این روش، بر روی یک سیستم نمونه شبیه‌سازی انجام شد که نتایج در حالت‌های مختلف حاکی از عملکرد صحیح در پیاده‌سازی این روش می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل‌شده مشاهده می‌گردد که روش به‌کاربرده در جبران افت ولتاژ ناشی از خطا بر روی سیستم موثر بوده و به جبران آن کمک می‌کند.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به پیشرفت روزافزون انرژی الکتریکی نحوه تولید انرژی از حالت سنتی و متمرکز به سمت پراکنده رفته است به گونه‌ای که انرژی تولیدشده در همان محل توسط مشترکین مصرف می‌شود استفاده از تولیدات پراکنده مزایای فراوانی از جمله بهبود کیفیت توان دارد. یکی از مشکلات قابل توجه در شبکه‌های توزیع، مسئله نامناسب بودن پروفایل ولتاژ می‌باشد. تأثیر واحدهای تولید پراکنده بر روی تنظیم ولتاژ می‌تواند مثبت و یا منفی باشد و این امر بستگی به سیستم توزیع، مشخصات واحدهای تولید پراکنده و نیز مکان نصب آن‌ها دارد. از آن جایی که ولتاژ یکی از مهم‌ترین معیارها از نقطه نظر کیفیت توان در ارائه خدمات توسط شرکت‌های برق می‌باشد. یکی از اهداف جانبی بهره‌برداری از واحدهای DG در شبکه توزیع بهبود پروفایل ولتاژ شبکه و حفظ مطمئن تر ولتاژ ترمینال مصرف کننده در محدوده‌ی مطلوب و استاندارد است. جریان یافتن الکتریسیته در خطوط باعث افت ولتاژ می‌شود و سیستم تولید پراکنده با تزریق توان به شبکه و تأمین بخشی از توان اکتیو و راکتیو مصرف کننده جریان جاری در خطوط را کاهش می‌دهد که باعث اصلاح ولتاژ شبکه و بهبود توان دریافتی می‌شود.

همچنین ممکن است در اثر حوادث ناگهانی مانند خطاهای گذرا ولتاژ دچار افت شدید شود یا بر اثر کمبود مصرف ولتاژ از حد استاندارد بالاتر رود در این حالت باز هم DG ها نقش موثری برای بهبود وضعیت ولتاژ ایفا می‌کنند.

در فصل چهارم انواع روش‌های کلید زنی اینورتر در حالت متصل به شبکه مورد بررسی قرار داده شده است که در بین آن‌ها روش PWM با توجه به مرسوم بودن و داشتن مزیت‌هایی همچون پاسخ دینامیک سریع، حفاظت پیک جریان ذاتی، استفاده مطلوب از خط DC ، کنترل جریان لحظه‌ای، فرکانس سوئیچینگ ثابت، نمونه‌های سوئیچ زنی بهینه، و طیف هارمونیک عالی نسبت به روش هیستریزس و $SVPWM$ اشاره کرد.

در این پایان‌نامه روش کنترلی مطرح شده به منظور بهبود ولتاژ در نقطه PCC و بهره‌برداری از بیشینه توان DG های اینورتر بیس در حالت متصل به شبکه بیان شده است که نشان می‌دهد GD ها در کیفیت توان سمت شبکه بسیار موثر هستند. در این روش اینورتر توان اکتیو و راکتیو را به طور همزمان کنترل و انتقال می‌دهد و بدون نیاز به استفاده از جبران سازها در شبکه مقدار ولتاژ را به سطح مطلوبی در حد استاندارد با توجه به مقدار خطا و ظرفیت DG می‌رساند. روش کنترلی ارائه شده نسبت به روش‌های جبران سازی دیگر، دارای مزایای زیر می‌باشد:

- در روش مذکور تأمین توان راکتیو با کنترل کلیدها در محل مصرف انجام شده است که باعث بالا رفتن راندمان خطوط انتقال و توزیع می‌شود.
- در این روش پاسخ سریع به تغییرات توان راکتیو داده شده است درحالی که در جبران‌کننده‌های استاتیک همانند کندانسورهای سنکرون، بانک‌های خازنی و جبران کننده-های استاتیک توان راکتیو قادر به پاسخگویی سریع نسبت به تغییر توان راکتیو نیست.

پیشنهادهای

- استفاده از روش کنترلی SVPWM جهت کنترل VSC در DG
- مزارع بادی با انواع ژنراتورها در حالت متصل به شبکه برای بالا بردن ظرفیت و سطح اتصال کوتاه DG
- استفاده از کنترل کننده فازی، شبکه عصبی و کنترل کننده‌های پیش‌گویانه جهت کنترل VSC در DG

مراجع:

- [1] T.Ackermann, G.Anderson, L.Soder, "Distributed Generation a definition", Elsevier science, PP195-204 Dec 2000.
- [2] H. Zareipour, et al, "Distributed Generation: Current Status and Challenges", 36th Annual North American Power Symposium, University of Idaho, August 2004.
- [3] T.Ackermann, G.Anderson, L.Soder, "Distributed Generation a definition", Elsevier science, PP195-204 Dec 2000.
- [4] P. Lawrence, S.Middlekauff, "Applying Distributed Generation Tools in Power Design System", IEEE Industry Applications Magazine, Jan/Feb 2005.
- [5] W. El-Khattam, M.M.A.Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits", Electric Power Syst. Res, pp 119-128, 2004.
- [6] M.Fu, Y.Xue, C.Ge, "Effect of distributed generation interconnection on voltage of distribution system", IEEE, the 6th international forum on strategic technology, pp 503-508, 2011.
- [7] Hoff, Wenger, Farmer, "The Value of Grid-Support Photovoltaics in Providing Distribution system Voltage Support", Proceedings of the American Solar Energy Society's Annual Conference, 1994.
- [8] "wind power systems", in encyclopedia of physical science and technology, 3rd ed. New York: academic, 2002.
- [9] B.Zhang, Y.Yang, L.V.Gan, "Dynamic control of wind/PV hybrid power systems based on an advanced particle swarm optimization", Electric Power Systems Research, Elsevier, pp.10-15, 2008.
- [10] Xing shaobang and Zhao ke-you, "Research on a novel SVPWM Algorithm", Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007.
- [11] L. Wei, Y. Wu, C. Li, H. Wang, S. Liu, and F. Li, "A novel space vector control of three-level PWM converter", in Proc. IEEE PEDS'99 Conference, vol. 2, July 1999, pp. 745-750.
- [12] Zhixiang lu, Yongzheng and Luiz A. C. Lopes, "A simple Control Circuit for a controlled Voltage Three-Level Hysteresis current Source Converter", IEEE ISIE 2006, Montreal, Quebec, Canada July 9-12, 2006.
- [13] Ray-shyang Lai and Khai D. T. Ngo, "A PWM Method for Reduction of switching Loss in full-bridge Inverter", IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONIC, VOL.10, NO 3, MAY 1995.
- [14] Zare, F. and name, A, "A new random current control Technique for single-phase Inverter with Bipolar and unipolar Modulation", Power Conversion Conference IEEE- Nagoy, 2-5 April 2007 pp:149-156.
- [15] Shuhui Li, Timothy A. Haskew, Richard P. Swatloski, and William Gathings, "Optimal and Direct-Current Vector Control of Direct-Driven PMSG Wind Turbines", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 27, NO. 5, MAY 2012.
- [16] Y. Chen, P. Pillary, and A. Khan, "PM wind generator topologies", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 6, pp. 1619-1626, Nov./Dec. 2005.

[17] G. Michalke, A. D. Hansen, and T. Hartkopf, "Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator", presented at the 2007 Eur.Wind Energy Conf. Exhib, Milan, Italy, May 7–10, 2007.

[18] Josep Pou, Rafael Pindado, Dushan Boroyevich, Pedro Rodriguez, "Limits of the Neutral-Point Balance in Back-to-Back-Connected Three-Level Converters" *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 19, NO. 3, MAY 2004.

[19] Keyuan Huang, Shoudao Huang, Feng She, Baimin Luo and Luoqiang Cai, "A Control Strategy for Direct-drive Permanent-magnet Wind-power Generator Using Back-to-back PWM Converter", Project Supported by National Eleventh-five 863 Research Program 2010.

[20] Sergio A. Diaz, Cesar Silva, Jorge Juliet, Hernan A. Miranda, "Indirect Sensorless Speed Control of a PMSG for Wind Application", *IEEE*, pp. 1844-1850, 2009.

[21] S. Li, T. A. Haskew, and Y. Hong, "PMSG maximum wind power extraction control using adaptive virtual lookup table approach in direct-current vector control structure", *Int. J. Energy Res*, vol. 35, no. 11, pp. 929–1022, Sep. 2011.

[22] Quincy Wang, Liuchen Chang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.19, No.5, pp.1242-1249, September 2004.

[23] Ramon C. Portillo, MaAngeles Martin Prats, Jose I. Leon, Juan Antonio Sanchez, Juan M. Carrasco, Eduardo Galvan, and Leopoldo Garcia Franquelo, "Modeling Strategy for Back-to-Back Three-Level Converters Applied to High-Power Wind Turbines" *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 53, NO. 5, OCTOBER 2006.

[24] F. Velenciaga and P. F. Puleston, "High-order sliding control for a wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous generator," *IEEE Trans. Energy Convers*, vol. 23, no. 3, pp. 860–867, Sep. 2008.

[25] P. Rodriguez, A. Timbus, R. Teodorescu, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Reactive power control for improving wind turbine system behavior under grid faults," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 24, no. 7, pp. 1798–1801, Jul. 2009.

Abstract

Today, Distribution Generation (DG) resources are widely used in order to supply the local power demands and to inject both the active and reactive powers to the network in Point of Common Coupling (PCC). Moreover, by using an appropriate reactive power control system, the voltage profile and power quality indices can also be improved. Hence, DGs mostly have resolved the distribution system drawbacks, and eliminate the need of using other reactive compensators.

Wind turbine is one of the most commonly used resources in this direction. On the other hands, such resources necessitate the use of power electronic convertors so that to be connected to the power grid. Therefore in this study, different controlling strategies for power electronic converters are analyzed.

In this thesis, a typical PMSG-Wind Turbine system is considered and connected to a weak grid via a back to back (B2B) converter, with the purposes of delivering the maximum level of active power to the network. Furthermore, by using an appropriate switching control strategy for the grid-side converter, the reactive power injection of DG is also controlled so that to enhance the voltage profile especially during the fault or over load occurrences. In this study, both the utilized converters are controlled via the Pulse Width Modulation (PWM) technique. Finally, the simulation is performed in MATLAB/Simulink software environment and the results are analyzed. The results perfectly demonstrate the performance of the designed DG system.