

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق
رساله دکتری مهندسی سیستم‌های قدرت

کنترل توان اکتیو و راکتیو مبتنی بر مشخصه افتی در یک ریز شبکه جزیره‌ای

نگارنده:

صاحب خان عبدال

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

اساتید مشاور:

پروفسور فریده بلاجرگ

دکتر ناصر حسین‌زاده

مهر ۱۴۰۰

شماره: ۱۸۳۶، ۱۴۰۷
تاریخ: ۱۴۰۷، ۷، ۲۷
ویرایش: —

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(تعیین درجه نمره رساله برای ورودی‌های ۹۴ و سال‌های قبل از آن)

بدینوسیله گواهی می‌شود آقای صاحب خان عبدال دانشجوی دکتری رشته مهندسی برق-قدرت به شماره دانشجویی ۹۲۱۵۹۶۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۷ از رساله نظری / عملی ☒ خود با عنوان: کنترل توان اکتیو و راکتیو مبتنی بر مشخصه افتی در یک ریزشبهک جزیره‌ای دفاع و با اخذ نمره ۱۹.۴۹۴ به درجه: عالی نائل گردید.

☒ الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	☐ د) مردود: کمتر از ۱۵

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	استاد راهنمای اول	دکتر مهدی بانزاد	دانشیار	
۲	استاد راهنمای دوم	دکتر	—	—
۳	استاد مشاور اول	پروفسور فرده بلاجرگ	استاد	
۴	استاد مشاور دوم	دکتر ناصر حسین‌زاده	دانشیار	
۵	استاد مدعو داخلی	دکتر علی دستفان	دانشیار	
۶	استاد مدعو داخلی	دکتر حسین قلی‌زاده نرم	دانشیار	
۷	استاد مدعو خارجی	دکتر آلفرد باغرامیان	دانشیار	
۸	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید میثم سید برزگر	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای صاحب خان عبدال بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر حسین خسروی
تاریخ و امضاء مهر دانشکده:

تقدیم به

روح پاک عزیزان آسمانی

پدر و مادرم

تشکر و قدردانی

خدای را بسی شاکرم که از روی لطف و کرم خویش، توفیق اتمام این رساله را به بنده عنایت فرمودند.

از استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر مهدی بانژاد به خاطر راهنمایی‌های علمی، زحمات و پشتیبانی‌هایی که از ابتدا تا آخرین روز تحصیل و حضور اینجانب در دانشگاه صنعتی شاهرود متحمل شدند، تشکر و قدردانی می‌کنم. همچنین از استادان مشاور گرانقدرم جناب آقایان دکتر ناصر حسین‌زاده و پروفسور فرده بلاجرگ بابت راهنمایی‌ها و مشاوره‌های ارزشمند ایشان سپاسگزارم.

بر خود لازم می‌دانم از استادان بزرگوار جناب آقایان دکتر علی دستفان و دکتر حسین قلی‌زاده نرم از دانشگاه صنعتی شاهرود و همچنین جناب آقای دکتر آلفرد باگرامیان از دانشگاه گیلان برای پذیرفتن زحمت داوری این رساله، تشکر کنم.

از جناب آقای دکتر امیر حسن‌نیا و خانم مهندس نفیسه مفیدی بابت فراهم کردن تجهیزات و سخت‌افزارهای مورد نیاز برای پیاده‌سازی نمونه عملی ریزشبکه AC و کنترل آن در محیط آزمایشگاه ریزشبکه و شبیه‌ساز سیستم قدرت سپاسگزارم. همچنین از همکاری پرثمر خانم مهندس مریم اکبری در راستای استخراج نتایج عملی، صمیمانه تقدیر می‌کنم.

به پاس تمامی زحمات‌ها و حمایت‌های بی‌دریغ تمامی اعضای خانواده عزیزم که همواره مشوق و حامی من در دوران تحصیل بوده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را ابراز می‌نمایم.

در پایان بابت بهره‌مندی از کمک‌های بی‌دریغ و سودمند دوست دیرین و گرانقدرم جناب دکتر محمدحسین هلاکویی، از ایشان سپاسگزاری می‌کنم.

صاحب خان‌عبدال

مهر ۱۴۰۰

تعهد نامه

اینجانب صاحب خان عبدال دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی برق-قدرت دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله کنترل توان اکتیو و راکتیو مبتنی بر مشخصه افقی در یک ریزشبه جزیره‌ای تحت راهنمایی دکتر مهدی بانژاد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این رساله 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 رساله 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 رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته‌شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده رساله وجود داشته باشد.

چکیده

کنترل توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای شامل منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر، به دلیل عدم دسترسی به شبکه اصلی و همچنین کم‌بودن اینرسی، مسئله چالش برانگیزی است. سیستم کنترل باید توازن توان بین منابع تولید پراکنده و بارهای ریزشبکه را برقرار کند و به طور همزمان فرکانس و ولتاژ را در محدوده مجاز حفظ کند. در این رساله، با تعریف ایده شار مجازی به صورت انتگرال زمانی ولتاژ، از تکنیک مشخصه افتی شار مجازی بهره برده می‌شود. یکی از مشکلات روش مشخصه افتی، خطای تقسیم توان در شرایط نابرابری امپدانس خطوط است. برای حل این مشکل، یک استراتژی بهبودیافته مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی ارائه می‌شود که تقسیم توان دقیق و متناسب با ظرفیت اینورترها در شرایط نابرابری امپدانس خطوط را فراهم می‌کند. علاوه، ایده تقسیم توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای ولتاژ پایین که امپدانس خطوط دارای خاصیت اهمی هستند، بر اساس تکنیک مشخصه افتی شار مجازی تاکنون مطرح نشده است که در این رساله این طرح کنترلی ارائه می‌شود. در طرح پیشنهادی، برای کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت، روش کنترل مدل پیش‌بین شار مجازی طرح‌ریزی می‌شود. تقسیم توان دقیق و متناسب با ظرفیت هر اینورتر، بهبود کنترل فرکانس و ولتاژ از مزایای این طرح است.

در این رساله، یک طرح جدید مبتنی بر منطق فازی و تکنیک بهینه‌سازی زمان وظیفه برای کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت نیز ارائه می‌شود که امکان انتخاب دقیق‌تر بردارهای کلیدزنی را فراهم می‌کند. بدین ترتیب، عملکرد کنترل توان بهبود می‌یابد و تقسیم توان متناسب با ظرفیت هر منبع تولید پراکنده فراهم می‌شود. علاوه، کنترل ولتاژ هم بهبود پیدا می‌کند.

طرح‌های پیشنهادی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی می‌شوند. همچنین، استراتژی کنترل پیشنهادی برای ریزشبکه مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی بهبود یافته در شرایط نابرابری امپدانس خطوط، در محیط آزمایشگاه به صورت عملی پیاده‌سازی می‌شود. کارایی طرح‌های پیشنهادی با تحلیل نتایج و مقایسه عملکرد آنها با استراتژی متداول کنترل ریزشبکه ارزیابی می‌شود.

کلمات کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، اینورتر، تقسیم توان، ریزشبکه، شار مجازی، کنترل مشخصه افتی.

فهرست مقالات مستخرج از رساله

مقالات کنفرانسی

- [۱] ص. خان عبدال و م. بانژاد، "کنترل هماهنگ ولتاژ و جریان مبتنی بر منطق فازی بهینه شده در سیستم‌های فتوولتاییک بدون ترانسفورماتور در یک ریزشبکه در حالت مستقل از شبکه اصلی" پنجمین کنفرانس شبکه‌های هوشمند، کرمان، ایران، ۳۰ آذر تا ۱ دی ۹۵.

[2] S. Khanabdal, M. Banejad, F. Blaabjerg, and N. Hosseinzadeh, "Virtual Flux Droop Control With Constant Switching Frequency for Power Sharing Between Parallel Inverters in Islanded Microgrids," 27th Iranian Conference on Electrical Engineering, pp. 868-874, Yazd, Iran, 30 April- 2 May 2019.

مقالات ژورنالی

[3] S. Khanabdal, M. Banejad, F. Blaabjerg, and N. Hosseinzadeh, "A Novel Control Strategy of an Islanded Microgrid Based on Virtual Flux Droop Control and Direct Flux Fuzzy Control," International Journal of Engineering, vol. 34, no. 5, pp. 1274-1283, May 2021.

[4] S. Khanabdal, M. Banejad, F. Blaabjerg, and N. Hosseinzadeh, "A Novel Power Sharing Strategy Based on Virtual Flux Droop and Model Predictive Control for Islanded Low-Voltage AC Microgrids," Energies, vol. 14, no. 16, p. 4893, Aug. 2021.

[5] S. Khanabdal, M. Banejad, F. Blaabjerg and N. Hosseinzadeh, "Adaptive Virtual Flux Droop Control Based on Virtual Impedance in Islanded AC Microgrids," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, (early access).

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- پیشگفتار.....	۲
۲-۱- بیان مسئله.....	۶
۳-۱- انگیزه پژوهش.....	۷
۴-۱- اهداف پژوهش.....	۸
۵-۱- نوآوری‌های پژوهش.....	۹
۶-۱- ساختار رساله.....	۱۰
فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته در زمینه کنترل توان بر اساس مشخصه افتی.....	۱۱
۱-۱- مقدمه.....	۱۲
۲-۲- واحدهای DG.....	۱۲
۳-۲- ریزشبه‌ها.....	۱۳
۴-۲- مبدل‌های الکترونیک قدرت در ریزشبه.....	۱۵
۵-۲- اهمیت کنترل ریزشبه در حالت جزیره‌ای.....	۱۶
۶-۲- استراتژی‌های کنترل تقسیم توان در ریزشبه جزیره‌ای.....	۱۷
۱-۶-۲- کنترل متمرکز.....	۱۸
۲-۶-۲- کنترل رئیس-مرئوس.....	۱۹
۳-۶-۲- کنترل بر اساس مشخصه افتی.....	۲۰
۷-۲- بهبود عملکرد مشخصه افتی.....	۲۳
۱-۷-۲- افزودن عبارات جبرانسازی.....	۲۴
۲-۷-۲- تغییر پارامتر.....	۲۵

۲۸	۳-۷-۲- امیدانس مجازی
۳۳	۸-۲- مقایسه استراتژی‌های مختلف و بیان چشم‌انداز کار اصلی
۳۳	۱-۸-۲- ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های تقسیم توان
۳۳	۲-۸-۲- چشم‌انداز کار اصلی رساله
۳۶	۹-۲- جمع‌بندی

فصل سوم: استراتژی پیشنهادی برای کنترل توان بر اساس مشخصه افتی شار مجازی... ۳۷

۳۸	۱-۳- مقدمه
۳۹	۲-۳- بیان ریاضی روش مشخصه افتی مبتنی بر شار مجازی
۴۲	۳-۳- تاثیرات نابرابری امیدانس خطوط در مشخصه افتی شار مجازی
۴۵	۴-۳- طرح پیشنهادی مبتنی بر شار مجازی اصلاحی
۴۸	۵-۳- تحلیل سیگنال کوچک
۴۹	۱-۵-۳- تنظیم ضرایب جبران‌کننده
۵۲	۲-۵-۳- مطالعه تاثیر تاخیر زمانی در خطوط ارتباطی
۵۵	۶-۳- استراتژی کنترل توان برای ریزش‌بکه جزیره‌ای
۵۷	۷-۳- شبیه‌سازی روش پیشنهادی و تحلیل نتایج
۵۸	۱-۷-۳- نتایج
۷۰	۲-۷-۳- مقایسه نتایج
۷۱	۸-۳- پیاده‌سازی عملی روش پیشنهادی
۷۴	۱-۸-۳- حالت اول: مقایسه بین روش RVFD پیشنهادی با VFD
۷۶	۲-۸-۳- حالت سوم: ارزیابی روش RVFD پیشنهادی در شرایط کاهش بار
۷۸	۳-۸-۳- حالت سوم: ارزیابی روش RVFD پیشنهادی در شرایط افزایش بار

۹-۳- مبانی انتخاب پارامترهای فیلتر..... ۷۸

۱۰-۳- جمع‌بندی ۸۰

فصل چهارم: استراتژی پیشنهادی برای کنترل توان مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی و

کنترل مدل پیش‌بین شار در ریزشبه‌های ولتاژ پایین ۸۱

۱-۴- مقدمه ۸۲

۲-۴- استراتژی کنترل شار مجازی پیشنهادی ۸۳

۳-۴- استراتژی پیشنهادی کنترل ریزشبه مبتنی بر کنترل مدل پیش‌بین ۸۶

۱-۳-۴- کنترل تقسیم توان ۸۶

۲-۳-۴- مدل اینورتر ۸۷

۳-۳-۴- مکانیسم کنترل پیش‌بین ۸۸

۴-۳-۴- کمینه‌سازی تابع هزینه ۹۰

۴-۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج ۹۰

۵-۴- جمع‌بندی ۱۰۲

فصل پنجم: اصلاح طرح کنترل مستقیم شار برای بهبود تقسیم توان ۱۰۵

۱-۵- مقدمه ۱۰۶

۲-۵- روش متداول کنترل توان مبتنی بر شار مجازی در ریزشبه جزیره‌ای ۱۰۷

۱-۲-۵- بخش اول: تقسیم توان ۱۰۷

۲-۲-۵- بخش دوم: کنترل مبدل الکترونیک قدرت ۱۰۸

۳-۵- طرح پیشنهادی کنترل مستقیم فازی شار مجازی با زمان وظیفه بهینه ۱۱۰

۴-۵- ارزیابی عملکرد کنترل مستقیم فازی شار مجازی با زمان وظیفه بهینه ۱۱۶

۵-۵- جمع‌بندی ۱۲۶

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۱۲۹

۶-۱- نتیجه‌گیری..... ۱۳۰

۶-۲- پیشنهادات..... ۱۳۲

پیوست ۱: تئوری تقسیم توان..... ۱۳۳

پ-۱- تئوری تقسیم توان..... ۱۳۴

پ-۱-۱- امپدانس خط دارای خاصیت سلفی خالص باشد..... ۱۳۶

پ-۱-۲- امپدانس خط دارای خاصیت اهمی خالص باشد..... ۱۳۶

پ-۱-۳- محاسبه افت ولتاژ در امپدانس خط..... ۱۳۷

فهرست مراجع..... ۱۳۹

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): تخمین تولید جهانی انرژی الکتریکی از توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتاییک [۱۵]..... ۱۳
- شکل (۲-۲): ساختار کلی اتصال یک واحد DG به ریزشبه با واسط مبدل الکترونیک قدرت..... ۱۶
- شکل (۳-۲): ساختار کنترل متداول برای مبدل الکترونیک قدرت [۲۱]..... ۱۷
- شکل (۴-۲): استراتژی کنترل متمرکز [۲۶]..... ۱۹
- شکل (۵-۲): استراتژی کنترل رئیس/مرئوس [۳۰]..... ۲۰
- شکل (۶-۲): منحنی‌های مشخصه افتی متداول [۲۵]..... ۲۲
- شکل (۷-۲): منحنی‌های مشخصه مخالف [۲۵]..... ۲۳
- شکل (۸-۲): استفاده از عبارات جبران‌سازی برای بهبود عملکرد روش مشخصه افتی در مرجع [۳۳]..... ۲۵
- شکل (۹-۲): استفاده از عبارات جبران‌سازی برای بهبود عملکرد روش مشخصه افتی در مرجع [۳۵]..... ۲۶
- شکل (۱۰-۲): اعمال تکنیک امپدانس مجازی در حلقه کنترل ولتاژ [۲۸]..... ۲۹
- شکل (۱۱-۲): بلوک دیاگرام حالت کنترلی توان اکتیو-توان راکتیو در مرجع [۴۳]..... ۲۹
- شکل (۱۲-۲): بلوک دیاگرام طرح کنترلی امپدانس مجازی تطبیقی در حلقه کنترل ولتاژ [۴۴].... ۳۰
- شکل (۱۳-۲): بلوک دیاگرام طرح کنترلی امپدانس مجازی تطبیقی در حلقه کنترل ولتاژ [۴۵].... ۳۱
- شکل (۱۴-۲): طرح کنترل مبتنی بر امپدانس مجازی در [۴۶]..... ۳۱
- شکل (۱۵-۲): طرح کنترل مبتنی بر امپدانس مجازی در [۴۷]..... ۳۲
- شکل (۱۶-۲): کنترل تقسیم توان با استفاده از تکنیک مشخصه افتی مبتنی بر شار مجازی [۷].. ۳۵
- شکل (۱-۳): ساختار ارائه شده در فصل سوم..... ۳۸

شکل (۳-۲): مدل ساده شده ریزش شبکه جزیره‌ای.	۳۹
شکل (۳-۳): مدل ساده شده ریزش شبکه از دید اینورتر شماره دو (به عنوان مرجع).	۴۶
شکل (۳-۴): مشخصه افتی اصلاحی پیشنهادی مبتنی شار مجازی.	۴۷
شکل (۳-۵): مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته مبتنی بر مشخصه افتی $P-\delta$.	۵۰
شکل (۳-۶): مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته مبتنی بر مشخصه افتی $Q- V $.	۵۱
شکل (۳-۷): مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته مبتنی بر مشخصه افتی $P-\delta$ با در نظر گرفتن تاخیر زمانی τ_D .	۵۴
شکل (۳-۸): مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته مبتنی بر مشخصه افتی $Q- V $ با در نظر گرفتن تاخیر زمانی τ_D .	۵۴
شکل (۳-۹): بلوک دیاگرام طرح کنترل ریزش شبکه پیشنهادی.	۵۶
شکل (۳-۱۰): بردارهای فضایی ولتاژ و بردارهای کلیدزنی مربوطه در صفحه $\alpha-\beta$.	۵۶
شکل (۳-۱۱): دیاگرام شماتیک ریزش شبکه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو اول.	۵۸
شکل (۳-۱۲): تقسیم توان بر اساس روش VFD متداول در سناریو اول.	۶۰
شکل (۳-۱۳): تقسیم توان بر اساس روش CD-VI در سناریو اول.	۶۰
شکل (۳-۱۴): تقسیم توان بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو اول.	۶۰
شکل (۳-۱۵): ولتاژ PCC (استراتژی CD-VI در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو اول.	۶۰
شکل (۳-۱۶): ولتاژ PCC (استراتژی RVFD پیشنهادی در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو اول.	۶۱
شکل (۳-۱۷): دیاگرام شماتیک ریزش شبکه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو دوم.	۶۱
شکل (۳-۱۸): تقسیم توان بر اساس روش VFD متداول در سناریو دوم.	۶۲
شکل (۳-۱۹): تقسیم توان بر اساس روش CD-VI در سناریو دوم.	۶۲
شکل (۳-۲۰): تقسیم توان بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو دوم.	۶۲

- شکل (۳-۲۱): ولتاژهای طرف بار (روش CD-VI در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو دوم. ۶۳
- شکل (۳-۲۲): ولتاژهای طرف بار (استراتژی RVFD پیشنهادی در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو دوم. ۶۳
- شکل (۳-۲۳): جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس روش VFD متداول در سناریو دوم. ۶۴
- شکل (۳-۲۴): جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس روش CD-VI در سناریو دوم. ۶۴
- شکل (۳-۲۵): جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو دوم. ۶۴
- شکل (۳-۲۶): دیاگرام شماتیک ریزشبه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو سوم. ۶۵
- شکل (۳-۲۷): تقسیم توان بر اساس روش VFD متداول در سناریو سوم. ۶۶
- شکل (۳-۲۸): تقسیم توان بر اساس روش CD-VI در سناریو سوم. ۶۶
- شکل (۳-۲۹): تقسیم توان بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو سوم. ۶۶
- شکل (۳-۳۰): جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس روش VFD متداول در سناریو سوم. ۶۷
- شکل (۳-۳۱): جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس روش CD-VI در سناریو سوم. ۶۷
- شکل (۳-۳۲): جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو سوم. ۶۷
- شکل (۳-۳۳): ولتاژهای طرف بار (روش CD-VI در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو سوم. ... ۶۸
- شکل (۳-۳۴): ولتاژهای طرف بار (استراتژی RVFD پیشنهادی در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو سوم. ۶۸
- شکل (۳-۳۵): فرکانس ریزشبه در سناریو سوم. ۶۹
- شکل (۳-۳۶): دیاگرام شماتیک نمونه آزمایشگاهی ریزشبه جزیره‌ای مورد مطالعه. ۷۲
- شکل (۳-۳۷): نمونه آزمایشگاهی ریزشبه و سیستم کنترل. ۷۳

- شکل (۳-۳۸): منحنی‌های ولتاژ طرف بار بر اساس روش VFD متداول در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی. ۷۴
- شکل (۳-۳۹): منحنی‌های ولتاژ طرف بار بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی. ۷۴
- شکل (۳-۴۰): منحنی‌های جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس روش VFD متداول در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی. ۷۵
- شکل (۳-۴۱): منحنی‌های جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی. ۷۶
- شکل (۳-۴۲): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبه در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی. ۷۶
- شکل (۳-۴۳): منحنی‌های ولتاژ طرف بار بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در حالت دوم از نتایج آزمایشگاهی. ۷۷
- شکل (۳-۴۴): منحنی‌های جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در حالت دوم از نتایج آزمایشگاهی. ۷۷
- شکل (۳-۴۵): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبه در حالت دوم از نتایج آزمایشگاهی. ۷۷
- شکل (۳-۴۶): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبه در حالت سوم از نتایج آزمایشگاهی. ۷۸
- شکل (۳-۴۷): بلوک دیاگرام فیلتر پایین‌گذر LC مرتبه دوم. ۷۹
- شکل (۳-۴۸): دیاگرام بُد برای تابع تبدیل فیلتر پایین‌گذر LC مرتبه دوم. ۸۰
- شکل (۴-۱): ساختار ارائه شده در فصل چهارم. ۸۲
- شکل (۴-۲): ساختار ریزشبه جزیره‌ای مقاومتی مورد مطالعه. ۸۳
- شکل (۴-۳): ساختار استراتژی کنترل ریزشبه پیشنهادی. ۸۷
- شکل (۴-۴): بردارهای فضایی ولتاژ و بردارهای کلیدزنی مربوطه در صفحه $\alpha - \beta$ ۸۸

- شکل (۴-۵): دیاگرام شماتیک ریزشبه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو اول. ۹۲
- شکل (۴-۶): منحنی ولتاژ سمت بار بر اساس روش کنترل متداول در ریزشبه مقاومتی در سناریو اول. ۹۲
- شکل (۴-۷): منحنی ولتاژ سمت بار بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در ریزشبه مقاومتی در سناریو اول. ۹۲
- شکل (۴-۸): مقایسه ولتاژ خط برای روش متداول و استراتژی پیشنهادی در ریزشبه مقاومتی در سناریو اول. ۹۳
- شکل (۴-۹): منحنی جریان تزریقی DG1 به ریزشبه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو اول. ۹۳
- شکل (۴-۱۰): منحنی جریان تزریقی DG1 به ریزشبه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو اول. ۹۳
- شکل (۴-۱۱): جریان‌های تزریقی فاز a به ریزشبه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو اول. ۹۴
- شکل (۴-۱۲): جریان‌های تزریقی فاز a به ریزشبه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو اول. ۹۴
- شکل (۴-۱۳): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو اول. ۹۵
- شکل (۴-۱۴): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو اول. ۹۵
- شکل (۴-۱۵): مقایسه فرکانس ریزشبه مقاومتی در سناریو اول. ۹۶
- شکل (۴-۱۶): دیاگرام شماتیک ریزشبه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو دوم. ۹۷

- شکل (۴-۱۷): منحنی ولتاژ سمت بار بر اساس روش کنترل متداول در ریزشبهه مقاومتی در سناریو دوم. ۹۸
- شکل (۴-۱۸): منحنی ولتاژ سمت بار بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در ریزشبهه مقاومتی در سناریو دوم. ۹۸
- شکل (۴-۱۹): مقایسه ولتاژ خط برای روش متداول و استراتژی پیشنهادی در ریزشبهه مقاومتی در سناریو دوم. ۹۸
- شکل (۴-۲۰): منحنی جریان تزریقی DG1 به ریزشبهه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو دوم. ۹۹
- شکل (۴-۲۱): منحنی جریان تزریقی DG1 به ریزشبهه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو دوم. ۹۹
- شکل (۴-۲۲): جریان‌های تزریقی فاز a به ریزشبهه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو دوم. ۱۰۰
- شکل (۴-۲۳): جریان‌های تزریقی فاز a به ریزشبهه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو دوم. ۱۰۰
- شکل (۴-۲۴): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبهه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو دوم. ۱۰۱
- شکل (۴-۲۵): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبهه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو دوم. ۱۰۱
- شکل (۴-۲۶): مقایسه فرکانس ریزشبهه مقاومتی در سناریو دوم. ۱۰۲
- شکل (۵-۱): ساختار ارائه شده در فصل پنجم. ۱۰۶
- شکل (۵-۲): یک ریزشبهه جزیره‌ای با اینورترهای موازی. ۱۰۸

- شکل (۵-۳): طرح کنترل متداول ریزشبهه جزیره‌ای مبتنی بر شار مجازی. ۱۰۹
- شکل (۵-۴): بردارهای کلیدزنی در صفحه $\alpha - \beta$. ۱۱۰
- شکل (۵-۵): استراتژی کنترل ریزشبهه پیشنهادی مبتنی بر مشخصه شار مجازی، کنترل مستقیم فازی شار مجازی و بهینه‌سازی زمان وظیفه. ۱۱۱
- شکل (۵-۶): بلوک دیاگرام کنترل مبتنی بر منطق فازی. ۱۱۲
- شکل (۵-۷): تابع عضویت e_δ . ۱۱۴
- شکل (۵-۸): تابع عضویت e_ψ . ۱۱۴
- شکل (۵-۹): تابع عضویت θ . ۱۱۴
- شکل (۵-۱۰): تابع عضویت متغیر خروجی. ۱۱۵
- شکل (۴-۱۱): دیاگرام شماتیک ریزشبهه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو اول. ۱۱۷
- شکل (۵-۱۲): ولتاژ طرف بار برای واحد DG1 در سناریو اول. ۱۱۷
- شکل (۵-۱۳): منحنی جریان‌های سه‌فاز تزریقی DG1 به ریزشبهه در سناریو اول. ۱۱۹
- شکل (۵-۱۴): منحنی جریان‌های تزریقی DGها به ریزشبهه در سناریو اول. ۱۱۹
- شکل (۵-۱۵): توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی واحدهای DG به ریزشبهه در سناریو اول. ۱۲۰
- شکل (۵-۱۶): منحنی شار مجازی اینورتر ۱ در صفحه $\alpha - \beta$ در سناریو اول. ۱۲۱
- شکل (۴-۱۷): دیاگرام شماتیک ریزشبهه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو دوم. ۱۲۲
- شکل (۵-۱۸): ولتاژ طرف بار برای واحد DG1 در سناریو دوم. ۱۲۲
- شکل (۵-۱۹): منحنی جریان‌های سه‌فاز تزریقی DG1 به ریزشبهه در سناریو دوم. ۱۲۴
- شکل (۵-۲۰): منحنی جریان‌های تزریقی DGها به ریزشبهه در سناریو اول. ۱۲۴
- شکل (۵-۲۱): توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی واحدهای DG به ریزشبهه در سناریو دوم. ۱۲۵
- شکل (۵-۲۲): منحنی شار مجازی اینورتر ۱ در صفحه $\alpha - \beta$ در سناریو دوم. ۱۲۶
- شکل (پ-۱): مدار معادل یک واحد DG متصل به باس مشترک. ۱۳۴

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲): مزایا و معایب طرح‌های کنترل توان [۳۱] ۲۱
- جدول (۲-۲): مزایا و معایب استراتژی‌های مختلف برای بهبود عملکرد روش مشخصه افتی. ۳۴
- جدول (۱-۳): جدول کلیدزنی برای استراتژی DFC. ۵۷
- جدول (۲-۳): پارامترهای شبیه‌سازی برای ریزش‌بکه و سیستم کنترل در سناریو اول. ۵۹
- جدول (۳-۳): مقایسه عددی بین استراتژی RVFD پیشنهادی و روش‌های متداول بر اساس سناریو سوم. ۷۱
- جدول (۴-۳): پارامترهای آزمایشگاهی برای ریزش‌بکه و سیستم کنترل. ۷۲
- جدول (۱-۴): بردارهای کلیدزنی و بردارهای فضایی ولتاژ برای یک اینورتر دوسطحی سه فاز. ۸۹
- جدول (۲-۴): اندازه متغیرهای ریزش‌بکه و کنترل در سناریو اول. ۹۱
- جدول (۳-۴): اندازه متغیرهای ریزش‌بکه و کنترل در سناریو دوم. ۹۷
- جدول (۴-۴): مقایسه نتایج در شرایط نامی برای سناریو دوم. ۱۰۲
- جدول (۱-۵): جدول بردارهای کلیدزنی مبتنی بر کنترل‌کننده منطق فازی. ۱۱۵
- جدول (۲-۵): اندازه متغیرهای ریزش‌بکه و کنترل در سناریو اول. ۱۱۸
- جدول (۳-۵): اندازه متغیرهای ریزش‌بکه و کنترل در سناریو دوم. ۱۲۳

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

محدودیت منابع فسیلی و پیامدهای حاصل از تغییرات زیست محیطی و آب و هوای جهانی، فرصت‌های مناسبی را برای رقابت منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ نظیر انرژی باد و خورشید با انرژی‌های فسیلی، خصوصاً در کشورهایی با پتانسیل بالای باد و تابش ایجاد نموده است. بسیاری از کشورهای جهان در تلاشند تا حداکثر استفاده از این منابع انرژی را به دست آورده و زیان‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش دهند [۱-۲]. در این راستا، واحدهای تولید پراکنده^۲ (DG) به عنوان یک راهکار موثر برای استفاده از پتانسیل منابع انرژی تجدیدپذیر به شمار می‌روند. در دهه‌های گذشته، یکی از چالش‌های گسترش استفاده از منابع تولید پراکنده، بالا بودن هزینه تولید انرژی الکتریکی در آنها بود. در این راستا، توسعه فناوری در عین حال که باعث کاهش هزینه تولید انرژی الکتریکی شده است، افزایش قابلیت اطمینان و بازدهی را نیز در این واحدها بهبود داده است؛ اما همچنان تحقیقات گسترده‌ای به منظور کاهش هرچه بیشتر هزینه تولید انرژی الکتریکی در این سیستم‌ها و افزایش بازدهی آنها با به کار گیری روش‌های نوین کنترلی در حال انجام است [۳-۴].

ایده ریزشکه^۳ به عنوان راهکاری موثر جهت تسهیل استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های الکتریکی به شمار می‌رود [۲]. ریزشکه‌ها به صورت سیستم‌هایی تعریف می‌شوند که شامل حداقل یک واحد DG و بارهای متصل به آن هستند و توانایی عملکرد جزیره‌ای (مستقل از شبکه اصلی) را دارند. همچنین، ریزشکه‌ها قابلیت اطمینان بالاتری ارائه می‌دهند و وابستگی کمتری به شبکه برق سراسری دارند. از آنجایی که واحدهای تولید پراکنده منبع اصلی تامین توان در ریزشکه‌ها هستند، مشخصه‌های دینامیکی این واحدها، رفتار دینامیکی ریزشکه را تعیین می‌کنند. در بین واحدهای DG مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، توربین‌های بادی و آرایه‌های خورشیدی کاربرد بیشتری دارند. از آنجایی که این

¹ Renewable Energy Sources

² Distributed Generation

³ Microgrid

منابع از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت^۱ به ریزشبه‌ها متصل می‌شوند، بنابراین الکترونیک قدرت نقش مهمی در ریزشبه‌ها ایفا می‌کند. در نتیجه برای دستیابی به مزایای ریزشبه‌ها، استفاده از روش‌های بهینه و هوشمند برای کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت ضروری است [۵-۶].

ریزشبه‌ها می‌توانند در دو حالت کاری متصل به شبکه^۲ و مستقل از آن کار می‌کنند. در حالت متصل به شبکه، ریزشبه‌ها از طریق یک یا چند نقطه به شبکه سراسری متصل می‌شود و به صورت موازی با آن کار می‌کند. اگر بنا به دلایلی از جمله خطاهای رخ داده در شبکه سراسری، تامین توان بارهای حساس در شرایط افت کیفیت در شبکه، سرویس‌های دوره‌ای و ...، ریزشبه‌ها از شبکه سراسری جدا شود و به صورت مستقل به تامین بارهای محلی خود بپردازند، آنگاه ریزشبه‌ها در حالت مستقل از شبکه یا حالت جزیره‌ای^۳ قرار دارد [۳] و [۵].

یکی از مسائل مهم و اساسی در ریزشبه‌ها، کنترل توان و برقراری توازن توان بین منابع تولید و بارهای محلی موجود در آن‌ها می‌باشد. این کنترل در دو حالت متصل و مستقل از شبکه سراسری باید به گونه‌ای انجام شود که اندازه ولتاژ و فرکانس تمامی باس‌ها در محدوده مجاز باشند و تقاضای توان‌های اکتیو و راکتیو بار به صورت متناسب بین واحدهای تولید تقسیم شود. در حالت متصل به شبکه، با فرض دسترسی به یک شبکه قوی، به دلیل اینرسی^۴ کمتر ریزشبه نسبت به شبکه اصلی، فرکانس و ولتاژ توسط شبکه اصلی کنترل می‌شود. بعلاوه، شبکه سراسری همانند باس بی‌نهایت عمل می‌کند و ریزشبه‌ها، توان تولیدی اضافی را به شبکه اصلی تزریق می‌کند و در صورت کمبود تولید توان، از شبکه اصلی توان مورد نیاز را می‌تواند جذب کند. با توجه به مشکل تر بودن کنترل ریزشبه‌ها در حالت جزیره‌ای نسبت به حالت متصل به شبکه، به دلیل عدم دسترسی به شبکه اصلی، ضرورت دارد که برای یک ریزشبه‌ها جزیره‌ای، از یک استراتژی کارآمد کنترلی استفاده شود تا توان مورد نیاز بار به درستی تامین شود و به طور همزمان، ولتاژ و فرکانس در محدوده مجاز حفظ شوند.

¹ Power Electronics Converters

² Grid Connected

³ Islanded

⁴ Inertia

ساختار استراتژی کنترل ریزشبه‌های جزیره‌ای به طور متداول شامل دو سطح هستند:

- کنترل تقسیم توان^۱: برای تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو بارهای شبکه بین واحدهای تولیدی به طور متداول از تکنیک مشخصه افتی^۲ استفاده می‌شود. در این روش، فرکانس به صورت تابعی از توان اکتیو و دامنه ولتاژ به صورت تابعی از توان راکتیو در نظر گرفته می‌شوند. خروجی این قسمت مقادیر ولتاژ و فرکانس نقطه کار ریزشبه را تعیین می‌کند که به عنوان مقادیر مرجع در قسمت دوم (کنترل مبدل‌ها) به کار گرفته می‌شوند [۱-۲].
- کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت: بعد از تعیین فرکانس و دامنه ولتاژ در نقطه کار ریزشبه، در بخش دوم، به طور متداول، از یک ساختار کنترلی با حلقه بیرونی کنترل ولتاژ و حلقه داخلی کنترل جریان و تعداد زیادی سیگنال‌های پسخور^۳ و سرانجام مدولاسیون پهنای پالس سینوسی^۴ (SPWM) استفاده می‌شود تا فرمان‌های کلیدزنی برای مبدل‌های الکترونیک قدرت فراهم شود [۷].

استفاده از طرح کنترل توان مبتنی بر مشخصه افتی در ریزشبه‌های جزیره‌ای نیازی به استفاده از خطوط ارتباطی بین واحدهای کنترل ندارد و قابلیت "نصب و اجرا"^۵ را برای منابع فراهم می‌کند؛ اما دارای معایبی از جمله عملکرد ضعیف در تقسیم توان راکتیو، نوسانات ولتاژ و فرکانس، نیاز به روابط پیچیده برای تبدیل قاب متغیرهای کنترلی است [۱] و [۸-۹].

هدف این رساله بهبود عملکرد عملکرد استراتژی کنترل ریزشبه جزیره‌ای مبتنی بر مشخصه افتی است. در این راستا، برای تقسیم صحیح توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بارهای ریزشبه بین DGها از تکنیک مشخصه افتی مبتنی بر شار مجازی^۶ (VFD) استفاده می‌شود. در این روش، به طور متداول از تکنیک کنترل مستقیم شار^۷ (DFC) برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی بهره برده می‌شود. این استراتژی

¹ Power Sharing Control

² Droop Technique

³ Feedback

⁴ Sinusoidal Pulse Width Modulation

⁵ Plug and Play

⁶ Virtual Flux Droop

⁷ Direct Flux Control

منجر به یک طرح کارآمد خواهد شد و در نتیجه کنترل توان اکتیو و راکتیو بهبود می‌یابد. همچنین با حذف حلقه خارجی کنترل ولتاژ و حلقه داخلی کنترل جریان، ساختار کنترل ساده‌ای حاصل می‌شود که به طور مستقیم متغیرهای اصلی کنترل را تنظیم می‌کند. با این وجود، استفاده از این طرح کنترلی، مشکلاتی را نیز به همراه خواهد داشت. از جمله اینکه به دلیل محدود بودن بردارهای کلیدزنی، انتخاب بردارهای کلیدزنی با دقت کافی انجام نمی‌شود. به عبارت دیگر هیچکدام از بردارهای کلیدزنی نمی‌توان تغییرات مطلوب به طور کامل فراهم کند، برای حل این مشکل، یک استراتژی جدید کنترلی مبتنی بر منطق فازی^۱ برای انتخاب دقیق‌تر بردارهای کلیدزنی پیشنهاد می‌شود و با بهینه‌سازی زمان وظیفه، در هر دوره کنترل، ترکیب یک بردار فعال و یک بردار غیرفعال به کلیدهای اینورتر اعمال می‌شود.

در شرایط نابرابر بودن امپدانس‌های خطوط^۲، عملکرد استراتژی کنترل ریزش‌بکه مبتنی بر مشخصه اف‌تی به طور نامطلوبی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. برای حل این مسئله، نیز یک طرح کنترلی جدید ارائه خواهد شد که تقسیم توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بارها به درستی و متناسب با ظرفیت هر DG در ریزش‌بکه تقسیم خواهد شد.

در طرح‌ریزی استراتژی‌های کنترل ریزش‌بکه، به طور متداول، خطوط را به صورت سلفی در نظر می‌گیرند و از خاصیت اهمی خط صرف‌نظر می‌کنند. این ایراد در روش‌های جدید نیز وجود دارد. در حالی که در شبکه‌های ولتاژ پایین، امپدانس خطوط خاصیت اهمی دارند، به همین علت، در این رساله روابط جدیدی مبتنی بر مشخصه اف‌تی شار مجازی برای کنترل تقسیم توان ارائه می‌شود. بعلاوه، استفاده از کنترل مدل پیش‌بین برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی در مبدل‌های الکترونیک قدرت، یکی دیگر از جنبه‌های نوآوری این پژوهش است که با بهینه‌کردن تابع هدفی که منعکس‌کننده رفتار مطلوب سیستم است، باعث سادگی سیستم کنترل و عملکرد بهتر آن می‌شود.

^۱ Fuzzy Logic

^۲ Mismatched Line Impedances

۱-۲- بیان مسئله

نیاز به تامین توان با کیفیت مطلوب و قابلیت اطمینان بالا از یک سو و مشکلات تولید توان در نیروگاه‌های متمرکز و انتقال آن به محل مصرف از سوی دیگر، سبب گردیده است که استفاده از واحدهای DG و ریزشبه‌ها با رشد قابل ملاحظه‌ای روبرو شود. به دلیل مشخصه‌های عملکرد متفاوت ریزشبه نسبت به سیستم‌های الکتریکی متداول، به استراتژی‌های کنترلی با عملکرد جدید نیاز است. ریزشبه دارای دو حالت کاری متصل به شبکه و مستقل از آن می‌باشد؛ در شرایطی که ریزشبه به یک شبکه سراسری پایدار متصل است، شبکه سراسری همانند باس بی‌نهایت عمل می‌کند و ریزشبه در مواقع لزوم با شبکه سراسری می‌تواند تبادل توان انجام دهد. بنابراین کنترل ریزشبه و برقراری تعادل بین تولید و مصرف توان در این وضعیت راحت‌تر است. اما در حالت عملکرد جزیره‌ای، سیستم کنترل ریزشبه علاوه بر تامین توان اکتیو و راکتیو بارها، باید به طور همزمان کنترل ولتاژ و فرکانس را نیز مدنظر قرار دهد و از آنجایی که اینرسی ریزشبه از شبکه سراسری بسیار کمتر است، کنترل ریزشبه در حالت جزیره‌ای با مشکلات و چالش‌های مضاعفی روبرو می‌باشد.

هدف از کنترل ریزشبه، حفظ ولتاژ و فرکانس در محدوده کنترلی مجاز و تامین پیوسته توان‌های اکتیو و راکتیو است. در حالت متصل به شبکه، فرکانس و ولتاژ در نقطه اتصال مشترک از طرف شبکه سراسری به ریزشبه تحمیل می‌شود و وظیفه مبدل‌های توان در ریزشبه، کنترل توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بارها و همچنین توان مبادله‌شده با شبکه می‌باشد. اما در حالت عملکرد جزیره‌ای، شبکه اصلی به دلیل عدم وجود اتصال با ریزشبه، نقشی در کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبه نمی‌تواند ایفا کند. در نتیجه، مبدل‌های توان علاوه بر کنترل توان اکتیو و راکتیو، باید ولتاژ و فرکانس ریزشبه را نیز کنترل کنند؛ زیرا بدون کنترل ولتاژ و فرکانس و به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای بار و تغییرات آن‌ها، امکان انحراف ولتاژ و فرکانس از مقادیر نامی وجود دارد و در نتیجه، ریزشبه عملکرد مناسب خود را از دست می‌دهد. بنابراین، طراحی یک سیستم کنترل کارآمد برای توان اکتیو و راکتیو در یک ریزشبه جزیره‌ای، اهمیت بسیار زیادی دارد. در منابع و مراجع معتبر، چندین طرح کنترلی متفاوت برای حالت جزیره‌ای

وجود دارد [۹-۱۱]. به طور مشابه با شبکه‌های متداول، تکنیک مشخصه‌افتی در ریزشبکه‌ها تقسیم‌توان مورد نیاز بار بین منابع تولید انرژی در ریزشبکه جزیره‌ای را کنترل می‌کند. با این وجود، به دلیل مشکلات این روش، امروزه تلاش‌های گسترده‌ای جهت ارائه روش‌های نوین برای کنترل ریزشبکه‌ها در حال انجام است. در این راستا، یکی از تکنیک‌های نوین برای کنترل ریزشبکه، استفاده از مشخصه‌افتی شار مجازی می‌باشد. استفاده از این روش ساختار کنترلی ساده و کارآمدی را ارائه می‌دهد. با این وجود، این تکنیک کنترلی نیز دارای معایبی از جمله دقت پایین در انتخاب بردارهای کلیدزنی و همچنین عدم تقسیم صحیح توان در شرایط نابرابری امپدانس خطوط است. به علاوه، روابط مورد استفاده برای تقسیم توان در این روش، با فرض سلفی بودن امپدانس خطوط طرح‌ریزی شده است؛ در صورتی که در شبکه‌های ولتاژ پایین، امپدانس خطوط دارای خاصیت اهمی هستند. در این رساله برای حل این مشکلات، راهکارهایی به طور مجزا ارائه می‌شود که عملکرد سیستم کنترل ریزشبکه را به طور موثری بهبود می‌بخشند.

۳-۱- انگیزه پژوهش

منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبکه‌ها، به دلیل متغیر بودن شرایط جوی، عموماً غیرقابل توزیع^۱ هستند و در نتیجه سعی می‌شود که همواره در شرایط حداکثر تولید توان مورد بهره‌برداری قرار گیرند. بنابراین افزایش حضور این منابع در شبکه برق‌رسانی چالش‌های جدیدی را ایجاد می‌کند که رسیدگی به آن‌ها ضرورت دارد. با توجه به توانایی منابع ریزشبکه در تداوم برق‌رسانی به بارها، قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که این امر یکی از مهم‌ترین مزایای ریزشبکه‌ها می‌باشد [۳] و [۶]. در حال حاضر، استفاده از ریزشبکه‌ها در برق‌رسانی به بارهای مهم و حساس با سرعت قابل ملاحظه‌ای در حال افزایش است و انتظار می‌رود که با پیشرفت بیشتر سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و کاهش قیمت آن‌ها و همچنین بهبود هرچه بیشتر سیستم کنترل در ریزشبکه‌ها، شبکه‌های توزیع برق در سراسر دنیا به سمت ریزشبکه شدن پیش بروند.

^۱ Non-dispatchable

از آنجایی که منبع اصلی تامین انرژی در ریزش شبکه‌ها، واحدهای DG هستند، عملکرد این واحدها در رفتار ریزش شبکه تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. با توجه به چالش‌هایی که این منابع از دیدگاه کنترل توان با آن‌ها روبرو هستند و همچنین لزوم بالابودن قابلیت اطمینان ریزش شبکه‌ها در تامین توان بارهای حساس، انجام پژوهش‌های بیشتر در این راستا ضروری به نظر می‌رسد. انگیزه انجام این رساله، بهبود کنترل توان ریزش شبکه‌ها مبتنی بر مشخصه افتی، افزایش قابلیت‌های مبدل‌های الکترونیک قدرت متصل به منابع یادشده در شرایط عملکرد جزیره‌ای ریزش شبکه و همچنین دستیابی به طرح‌های کنترل توان در شرایط مختلف امپدانس خطوط ریزش شبکه می‌باشد.

۱-۴- اهداف پژوهش

برای توسعه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزش شبکه‌ها همراه با افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه تولید انرژی، بهبود سیستم کنترل ضرورت دارد. به همین دلیل، هدف کلی این رساله، بهبود عملکرد سیستم کنترل توان اکتیو و راکتیو مبتنی بر مشخصه افتی در یک ریزش شبکه جزیره‌ای است که آن را به زیربخش‌های ذیل می‌توان تقسیم‌بندی کرد:

- اصلاح روابط تقسیم توان مبتنی بر تکنیک مشخصه افتی در شرایط نابرابری امپدانس خطوط برای برطرف کردن تاثیر نامطلوب نابرابری امپدانس خطوط در استراتژی کنترل توان مبتنی بر مشخصه افتی ضرورت دارد که عملکرد ریزش شبکه با حضور منابع انرژی و مبدل‌های الکترونیک قدرت متصل به آن‌ها مدل‌سازی شود و تاثیر نابرابری امپدانس خطوط در روابط تقسیم توان بررسی شود. بدین ترتیب، با توجه به نتایج به دست آمده، اصلاحات لازم انجام می‌شود.
- ارائه روش تقسیم توان مبتنی بر تکنیک مشخصه افتی شار مجازی در ریزش شبکه‌های ولتاژ پایین در اکثر مقالات با موضوع تقسیم توان مبتنی بر تکنیک مشخصه افتی، اثر اهمی خط در نظر گرفته نشده است [۱۲]؛ بنابراین، یک استراتژی کنترل توان مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی با فرض اینکه امپدانس خطوط دارای خاصیت اهمی هستند، طرح‌ریزی می‌شود.

- ارائه روش کنترل پیشرفته توان اکتیو و راکتیو در یک ریزشبكة جزیره‌ای

برای تامین تقاضای بار و ارائه توان با کیفیت مطلوب و عملکرد مناسب مبدل‌های الکترونیک قدرت متصل به واحدهای تولیدی در یک ریزشبكة در حالت جزیره‌ای، ضرورت دارد که برای اعمال مقادیر تنظیم به دست آمده در بخش تقسیم توان، روش کنترلی پیشرفته‌تری ارائه داده شود تا هم کیفیت توان تحویلی به بارها ارتقا پیدا کند و هم عملکرد کل مجموعه بهبود یابد.

۱-۵- نوآوری‌های پژوهش

همانطور که پیشتر اشاره شد، استراتژی کنترل ریزشبكة شامل دو سطح کنترل تقسیم توان و کنترل مبدل الکترونیک قدرت است. با توجه به اهداف ارائه شده در بخش قبل، در این رساله نوآوری‌های ذیل ارائه شده است:

۱- استراتژی جدید برای کنترل توان مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی در شرایط نابرابری

امپدانس خطوط

برای دستیابی به تقسیم توان مورد نیاز بارهای ریزشبكة، متناسب با ظرفیت هر DG، تاثیرات نابرابری امپدانس خطوط در استراتژی کنترل توان در ریزشبكة مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی، به طور غیر مستقیم، با افزوده شدن عباراتی به روابط تقسیم توان، به طور مشابه با ایده امپدانس مجازی^۱ برطرف شد. این نوآوری در فصل سوم و در بخش کنترل تقسیم توان ارائه شده است.

۲- استراتژی جدید برای کنترل توان مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی در ریزشبكة‌های

ولتاژ پایین

در شرایطی که امپدانس خطوط، دارای خاصیت اهمی هستند، روش جدیدی برای تقسیم توان مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی ارائه شد که با ارائه یک ساختار ساده، امکان کنترل مستقیم متغیرهای کنترلی را فراهم کرده است. همچنین برای کنترل مبدل الکترونیک قدرت و تولید

^۱ Virtual Impedance

سیگنال‌های کلیدزنی، روش کنترل مدل پیش‌بین شار مجازی طرح‌ریزی شد. این استراتژی کنترل ریزش‌بکه در فصل چهارم ارائه شده است و نوآوری آن، هم در بخش کنترل تقسیم توان و هم در بخش کنترل مبدل الکترونیک قدرت طرح‌ریزی شده است.

۳- طرح کنترل مبدل الکترونیک قدرت مبتنی بر منطق فازی و بهینه‌سازی زمان وظیفه

با توجه به دقت پایین روش DFC در انتخاب بردارهای کلیدزنی، برای بهبود کنترل مبدل الکترونیک قدرت، از منطق فازی برای انتخاب بردار کلیدزنی بهره‌برده می‌شود. بعلاوه، برای عملکرد بهتر طرح کنترلی، تکنیک بهینه‌سازی زمان وظیفه ارائه می‌شود که امکان اعمال دو بردار کلیدزنی به مبدل الکترونیک قدرت در هر دوره کنترل را فراهم کرده است. این استراتژی کنترلی در فصل پنجم ارائه می‌شود. به عبارت دیگر، نوآوری سوم در این رساله، در فصل پنجم و در بخش کنترل مبدل الکترونیک قدرت ارائه شده است.

۱-۶- ساختار رساله

این پژوهش در شش فصل تنظیم شده است: در فصل اول چشم‌انداز کلی از طرح رساله ارائه شد و چارچوب آن به طور اجمالی معرفی گردید. در فصل دوم، استراتژی‌های کنترل ریزش‌بکه‌های جزیره‌ای دسته‌بندی می‌شوند. سپس طرح‌های پیشنهادی در مقالات معتبر برای بهبود عملکرد کنترل توان مبتنی بر مشخصه افقی بررسی و مقایسه می‌شوند. در فصل سوم، به منظور حل مشکل خطای تقسیم توان مورد نیاز بار در شرایط نابرابری امپدانس خطوط، یک ساختار کنترلی اصلاح شده ارائه می‌شود. در فصل چهارم، یک استراتژی جدید برای کنترل توان مبتنی بر مشخصه افقی شار مجازی و روش کنترل مدل پیش‌بین شار مجازی در ریزش‌بکه‌های ولتاژ پایین که امپدانس خطوط دارای خاصیت اهمی هستند، پیشنهاد می‌شود. در فصل پنجم نیز یک طرح جدید مبتنی بر منطق فازی و بهینه‌سازی زمان وظیفه برای کنترل مبدل الکترونیک قدرت با هدف بهبود کنترل توان ارائه می‌شود. سرانجام در فصل ششم، این رساله جمع‌بندی می‌شود و با بیان اجمالی نتایج این رساله، پیشنهادهای برای مطالعات بعدی در این راستا بیان می‌شود.

فصل دوم:

مروری بر کارهای گذشته

در زمینه کنترل توان بر اساس مشخصه افتی

۲-۱- مقدمه

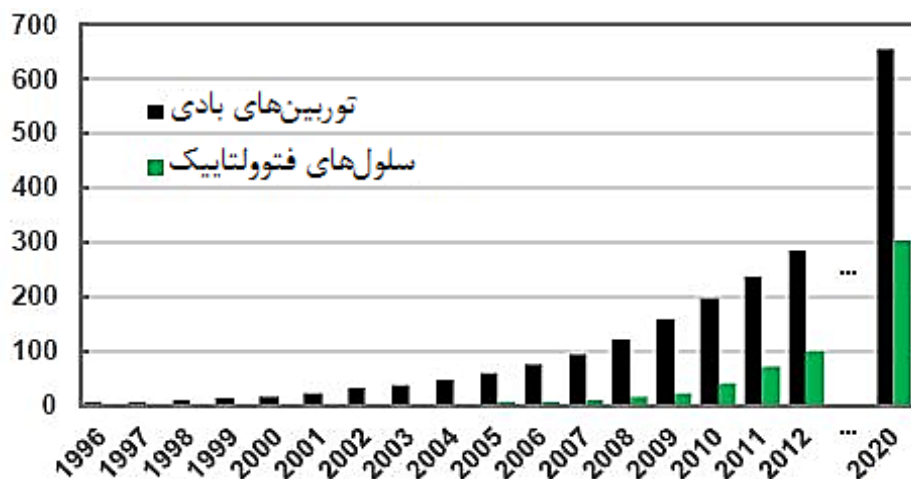
در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در فناوری واحدهای DG مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر حاصل شده است. بدین ترتیب، این واحدها به عنوان یک راهکار مناسب برای حل چالش‌های شبکه‌های متداول امروزی به شمار می‌روند. در این راستا، ایده ریزشبهه به عنوان راهکاری موثر برای بهره بردن از مزایای این واحدها، مورد استقبال گسترده‌ای قرار گرفته است. با توجه به ماهیت غیرقابل توزیع منابع انرژی تجدیدپذیر و نامناسب بودن اتصال مستقیم واحدهای DG به ریزشبهه، مبدل‌های الکترونیک قدرت به عنوان واسطه بین این واحدها با ریزشبهه نقش مهمی ایفا می‌کنند.

در این فصل، ابتدا راجع به واحدهای DG صحبت می‌شود؛ سپس مفهوم ریزشبهه به طور مختصر بیان می‌شود. در ادامه، کارکرد مبدل‌های الکترونیک قدرت در ریزشبهه تبیین می‌شود. از آنجایی که تامین توان مورد نیاز بارها در یک ریزشبهه باید به صورت مطلوب فراهم شود، استفاده از روش‌های نوین کنترلی اهمیت فراوانی دارد. با توجه به هدف این رساله که کنترل توان در یک ریزشبهه جزیره‌ای با رویکرد استفاده از مشخصه اف‌تی است، استراتژی‌های تقسیم توان مبتنی بر روش مشخصه اف‌تی معرفی می‌شوند. سپس، چالش‌های استفاده از تکنیک مشخصه اف‌تی و راهکارهایی که پژوهشگران در مراجع مختلف برای حل مشکلات این استراتژی ارائه داده‌اند، تحلیل می‌شوند. سرانجام با مقایسه روش‌های مختلف، ایده اصلی که این رساله بر مبنای آن طرح‌ریزی شده است، ارائه می‌شود.

۲-۲- واحدهای DG

پیشرفت‌های جوامع صنعتی در چند دهه اخیر منجر به تغییر شرایط آب و هوایی زمین شده است و عمده این تغییرات، تاثیرات ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی الکتریکی است [۱۳]. در سال ۲۰۱۲ میلادی، حدود ۳۲ درصد از مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایالات متحده در اثر نیروگاه‌های برق پدید آمده‌اند [۱۴]. در حال حاضر انرژی سوخت‌های فسیلی اصلی‌ترین منبع تولید انرژی در جهان است و پیش‌بینی می‌شود که تا چندین سال آینده نیز همچنان بخش اعظم تولید انرژی

مورد نیاز انسان به این منبع وابسته باشد. محدود بودن انرژی سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیطی ناشی از استفاده از آن‌ها به همراه افزایش نیاز روزافزون به انرژی سبب گردیده است تا محققان به طور پیوسته در جستجوی راهکارهایی در زمینه استفاده بهینه از منابع انرژی فسیلی و همچنین توسعه سیستم‌های بهره‌برداری از منابع دیگر انرژی باشند. یکی از این راهکارها، گسترش استفاده از واحدهای DG مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر است. در سال‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای در جهت توسعه و افزایش تولید توان از منابع انرژی تجدیدپذیر انجام گرفته است. در میان این منابع، توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتائیک، به عنوان فناوری‌های پیشرو، سهم بیشتری در تولید انرژی الکتریکی از منابع انرژی تجدیدپذیر ایفا می‌کنند. شکل (۱-۲) مقدار تولید انرژی الکتریکی از توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتائیک را در بازه زمانی ۱۹۹۶ میلادی تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. با توجه به اینکه، این منابع از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند، اینرسی کمی دارند. در نتیجه گسترش استفاده از آنها در شبکه، چالش برانگیز است و ضرورت دارد که به استراتژی‌های کنترل شبکه با حضور این دسته از منابع، توجه بیشتری شود [۱۵-۱۶].



شکل (۱-۲): تخمین تولید جهانی انرژی الکتریکی از توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتائیک [۱۵].

۳-۲- ریز شبکه‌ها

تحقیقات زیادی بر روی گسترش استفاده از واحدهای DG مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر انجام شده است و پیشرفت‌های خوبی در این راستا، حاصل شده است. همچنین نوآوری‌های بسیاری در مبدل‌های

الکترونیک قدرت به وجود آمده است که این امر باعث تمایل شرکت‌های برق به بهره‌برداری از واحدهای DG در سیستم توزیع و در نزدیکی مصرف‌کننده‌ها شده است. با این وجود، به دلیل متغیر بودن شرایط منابع اولیه انرژی تجدیدپذیر نظیر سرعت باد و تابش خورشید و ماهیت غیر قابل توزیع آنها، حضور تعداد زیادی از واحدهای DG مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های سنتی، مشکلاتی از قبیل نوسانات دامنه ولتاژ تغذیه یا عدم توازن بین تولید توان اکتیو و توان راکتیو با بارهای شبکه را به وجود می‌آورد که استفاده از این واحدها را محدود می‌کند [۱۷]. در این راستا، مفهوم ریز شبکه با یکپارچه سازی چندین واحد DG مبتنی بر منابع انرژی تجدید پذیر و بارهای محلی با یک استراتژی کنترل هماهنگ، به عنوان یک راهکار موثر و نویدبخش برای استفاده از مزایا و عملیاتی کردن ظرفیت‌های واحدهای DG به شمار می‌رود و نقش مهمی در حرکت به سمت تحقق شبکه های هوشمند آینده ایفا می‌کند [۶] و [۱۷].

ریزشبکه از دیدگاه مصرف کنندگان، به صورت یک سیستم کاملاً مجزا و مستقل دیده می‌شود که تمامی نیازهای طرف مصرف‌کننده اعم از تأمین انرژی، کیفیت توان و قابلیت اطمینان را تأمین می‌نماید. از دیدگاه شبکه قدرت اصلی، ریزشبکه به صورت یک عضو وابسته به سیستم قدرت در نظر گرفته می‌شود که بر اساس شرایط ریزشبکه، به عنوان تولیدکننده و یا بار دیده می‌شود. شاید بتوان گفت تفاوت ریزشبکه و شبکه اصلی در این است که اساساً مشخصات و توانایی‌های یک ریزشبکه توسط نیازمندی‌های داخلی آن تعریف می‌گردد، به‌طوری‌که اهداف فنی و اقتصادی آن از یک سو و قیدهای آن از سوی دیگر تأمین گردد؛ بدون آنکه توسعه ظرفیت و یا قابلیت اطمینان شبکه بزرگ‌تر را در نظر بگیرد [۱۸-۱۹]. اجزای ریزشبکه می‌تواند شامل تولیدات پراکنده، بارهای حساس و ادوات ذخیره انرژی باشد که با استفاده از یک استراتژی یکپارچه کنترل می‌شود. ریزشبکه دارای دو حالت کاری اصلی است:

۱- حالت متصل به شبکه.

ریزشبکه به صورت موازی با شبکه اصلی عمل می‌کند. همچنین، شبکه اصلی، به دلیل اینرسی بیشتر نسبت به ریزشبکه، ولتاژ و فرکانس را کنترل می‌کند. بعلاوه، نقش باس بی‌نهایت را ایفا

می‌کند و بنابراین می‌تواند اضافه توان تولیدی در ریزشبکه را جذب کند یا کمبود توان در آن را با تزریق توان از طریق نقطه اتصال، جبران کند.

۲- حالت مستقل از شبکه (جزیره‌ای).

در این حالت، دسترسی به شبکه اصلی وجود ندارد و ریزشبکه مسئول کنترل ولتاژ و فرکانس است و در عین حال، باید توازن بین تولید توان‌های اکتیو و راکتیو و نیازهای بارهای ریزشبکه در هر لحظه حفظ شود.

با توجه به مواردی که بیان گردید، می‌توان گفت که مهم‌ترین چالش در استفاده از ریزشبکه، کنترل آن در حالت جزیره‌ای است. هدف اصلی از این کنترل، حفظ ولتاژ و فرکانس در محدوده مجاز و پاسخ دینامیکی مطلوب به نیازهای بار در ریزشبکه است. اهداف دیگر همچون کیفیت توان، قابلیت اطمینان و تقسیم متناسب توان در ریزشبکه باید با در نظر گرفتن اهداف اصلی محقق شوند.

۲-۴- مبدل‌های الکترونیک قدرت در ریزشبکه

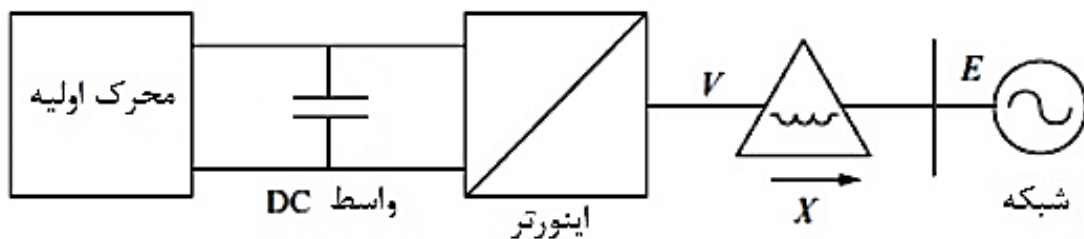
با توجه به اینکه اکثر واحدهای DG که در ریزشبکه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، برای اتصال مستقیم به شبکه مناسب نیستند، از مبدل‌های الکترونیک قدرت به عنوان واسط بین منابع و ریزشبکه (برای تبدیل DC-AC و AC-DC-AC) به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. بنابراین، این مبدل‌ها نقش مهمی در توسعه ریزشبکه‌ها بر عهده دارند [۲۰-۲۱]. ساختار کلی اتصال یک واحد DG به صورت شکل (۲-۲) است که می‌تواند دارای سه بخش اصلی زیر باشد:

- محرک اولیه^۱
- واسط DC^۲
- اینورتر منبع ولتاژی^۳

^۱ Prime Mover

^۲ DC Interface

^۳ Voltage Source Inverter (VSI)

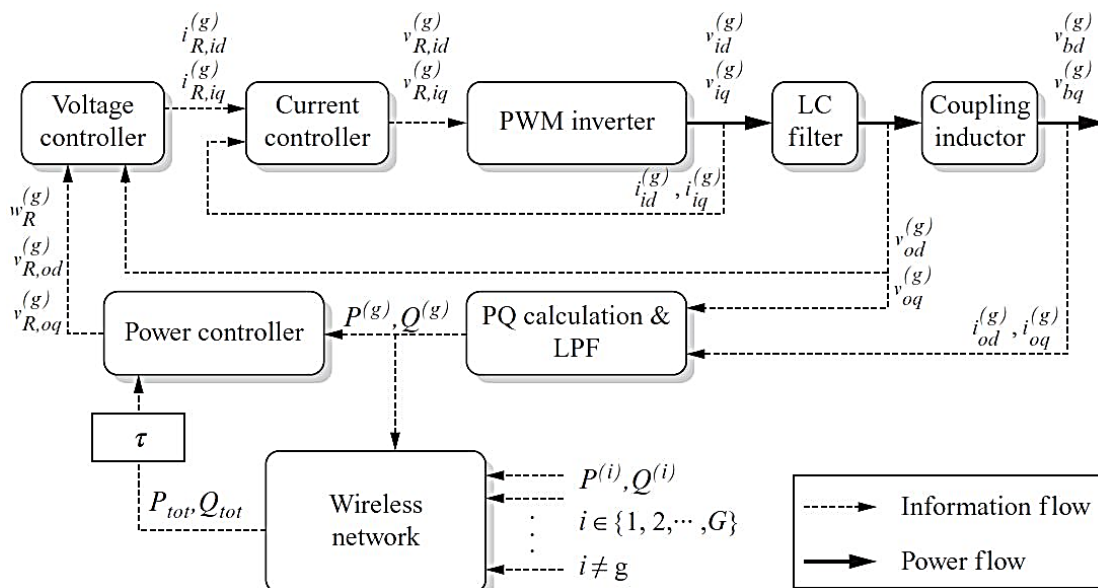


شکل (۲-۲): ساختار کلی اتصال یک واحد DG به ریزشبکه با واسط مبدل الکترونیک قدرت.

در این ساختار، با توجه به اینکه تبدیل توان به شکل مناسب در ریزشبکه، کنترل ولتاژ و فرکانس و همچنین کنترل توان تزریقی به ریزشبکه، همگی توسط اینورتر و با تنظیم دامنه و فاز ولتاژ خروجی انجام می‌شود، انتخاب یک استراتژی کنترل کارآمد، اهمیت زیادی دارد. ساختار کنترل متداول برای هر اینورتر در شکل (۳-۲) آمده است. در این ساختار، دو بخش اصلی وجود دارد: در بخش اول، تعیین مقادیر مرجع برای دامنه ولتاژ و فرکانس بر اساس کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو تزریق شده به ریزشبکه انجام می‌شود. در بخش دوم، سیگنال‌های کلیدزنی مناسب برای اینورتر با توجه به مقادیر مرجع در بخش اول، تولید می‌شود.

۲-۵- اهمیت کنترل ریزشبکه در حالت جزیره‌ای

ایده ریزشبکه‌ها با هدف بهبود سیستم تامین توان مورد نیاز مصرف‌کنندگان و افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان شبکه مورد توجه قرار گرفته است و با توجه به مطالبی که در بخش‌های قبلی بیان شد، اهمیت کنترل ریزشبکه در حالت جزیره‌ای بیشتر است. به همین علت، در این پژوهش به این مسئله پرداخته می‌شود. بعلاوه، با توجه به اینکه، اینورترها به صورت یک واسط بین منابع انرژی پراکنده و شبکه عمل می‌کنند و انرژی تولیدی در هر واحد DG با توجه به نیازهای بار کنترل می‌شود؛ بنابراین حضور یک طرح کنترلی برای تنظیم توان تولیدی واحدهای DG و بهبود کیفیت و قابلیت اطمینان آن مطابق با نیازهای بار، ضرورت دارد. با استفاده از طرح‌های کنترلی مختلف، ولتاژ و فرکانس شبکه باید ثابت باقی بماند و در عین حال، توان مورد نیاز بارها نیز تامین گردد. تکنیک‌های کنترلی و استراتژی‌های به کار گرفته‌شده به حالت عملکرد ریزشبکه وابسته هستند.



شکل (۲-۳): ساختار کنترل متداول برای مبدل الکترونیک قدرت [۲۱].

در ساختار ریزشبکه‌های جزیره‌ای، اینورترها با آرایش موازی متصل می‌شوند. این ساختار باعث افزایش انعطاف پذیری، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌ها می‌شود. از طرف دیگر، در این ساختار، مسئله تقسیم صحیح توان، اهمیت بسیار زیادی دارد [۲۲-۲۵]. به عبارت دیگر، در عین حال که استراتژی کنترل ریزشبکه دامنه ولتاژ و فرکانس را در محدوده مجاز حفظ می‌کند، باید این قابلیت را نیز داشته باشد که توان مورد نیاز بارهای شبکه را متناسب با ظرفیت هر اینورتر، بین واحدهای DG، تقسیم کند. استراتژی‌های کنترلی متنوعی با هدف برآورده کردن این الزامات، در مراجع مختلف ارائه شده است. برای پرداختن به این مسائل، در بخش بعدی، استراتژی‌های مختلف ارائه شده در مراجع مختلف برای کنترل تقسیم توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲-۶- استراتژی‌های کنترل تقسیم توان در ریزشبکه جزیره‌ای

در ریزشبکه‌های جزیره‌ای که شامل واحدهای DG مبتنی بر اینورتر با آرایش موازی هستند، استراتژی کنترل ریزشبکه اهمیت زیادی دارد؛ زیرا، مبدل‌های الکترونیک قدرت اینرسی کمی دارند و بدون داشتن یک طرح کنترلی کارآمد احتمال ناپایداری ریزشبکه، افزایش می‌یابد. در این ساختار، مبدل‌های الکترونیک قدرت به صورت اینورترهای منبع ولتاژ هستند و استراتژی کنترل ریزشبکه وظیفه تنظیم

ولتاژ و فرکانس در محدوده مجاز و همچنین حفظ تعادل بین تولید و مصرف انرژی الکتریکی با تقسیم صحیح توان مورد نیاز بار بین اینورترها را برعهده دارد. در این راستا، طرح‌های کنترلی مختلفی ارائه شده است که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

۲-۶-۱- کنترل متمرکز

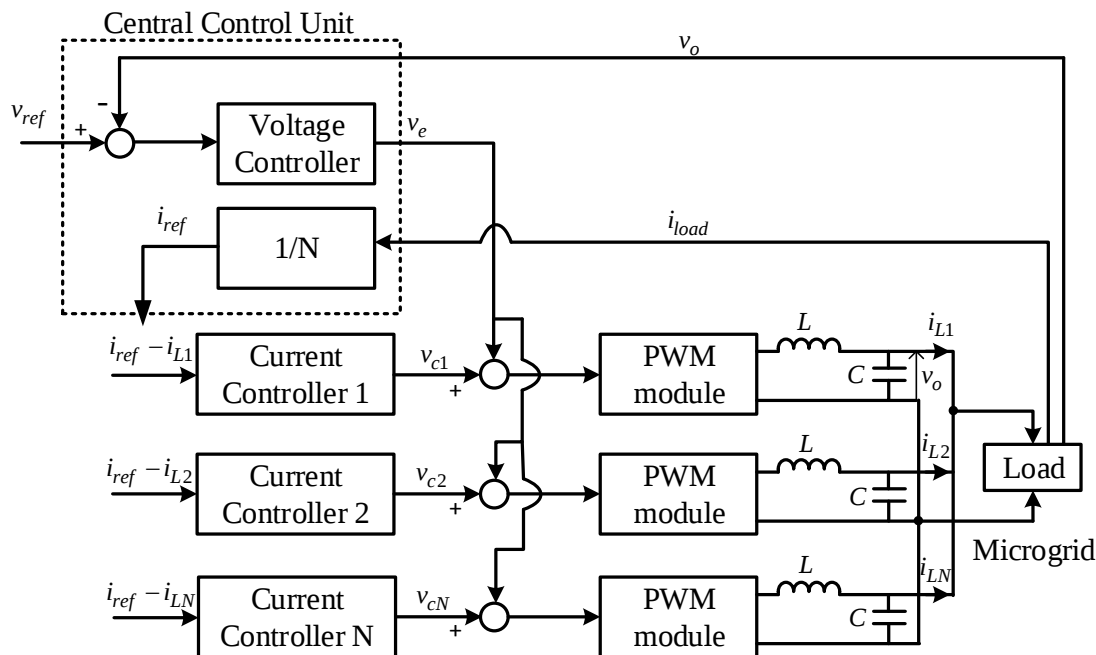
در استراتژی کنترل متمرکز، یک کنترل‌کننده مرکزی، عملکرد اینورترها را در ریزشبه هماهنگ می‌کند تا توازن بین تولید توان‌های اکتیو و راکتیو و توان مورد نیاز بارهای شبکه حفظ شود و در عین حال، دامنه ولتاژ و فرکانس باس مشترک در محدوده مجاز باقی بماند، شکل (۲-۴)، ساختار استراتژی کنترل متمرکز ریزشبه را نشان می‌دهد که در آن N تعداد اینورترها را نشان می‌دهد. یک خط ارتباطی بین کنترل‌کننده مرکزی و ماژول^۱ کنترل‌کننده هر اینورتر، مورد نیاز است. با استفاده از PLL^۲ همگامی^۳ فرکانس و فاز ولتاژ خروجی برای تمامی ماژول‌ها انجام می‌شود. همچنین مکانیسم تقسیم جریان، بارهای کل ریزشبه را اندازه‌گیری می‌کند و مقادیر مرجع جریان با در نظر گرفتن ضرایب وزنی (متناسب با ظرفیت هر اینورتر) از طریق کنترل‌کننده مرکزی به ماژول‌های کنترل اینورترها ارسال می‌شود. به طور همزمان، هر ماژول کنترل اینورتر، جریان خروجی را اندازه‌گیری و با مقدار مرجع مقایسه می‌کند. سپس مقدار خطای جریان محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن این مسئله که در این استراتژی کنترلی، اختلاف بین فرکانس و زاویه فاز ولتاژهای خروجی اینورترها ناچیز است، خطای جریان ناشی از خطای دامنه ولتاژ خواهد بود. به همین علت، در این روش، خطای تقسیم جریان در هر ماژول به عنوان یک سیگنال جبرانسازی در حلقه کنترل ولتاژ اعمال می‌شود تا اختلاف بین جریان‌های خروجی اینورترها حذف شود. بدین ترتیب، یکی از مزایای استراتژی کنترل متمرکز، تقسیم نسبتاً دقیق جریان مورد نیاز بار بین اینورترها برای تمامی زمان‌ها، حتی در شرایط گذرا می‌باشد. به عبارت دیگر، تقسیم توان هم در شرایط دائم و هم در شرایط گذرا، با دقت بالا و با استفاده از طرح کنترلی ساده‌ای

¹ Module

² Phase Locked Loop

³ Synchronization

انجام خواهد شد. با این حال، هزینه پیاده‌سازی آن به دلیل نیاز به خطوط مخابراتی پرسرعت و با پهنای باند بالا، نسبتاً گران است. بعلاوه، در نظر نگرفتن اثر امپدانس خط در این استراتژی کنترلی، یکی دیگر از معایب اصلی این روش است [۲۶-۲۸].



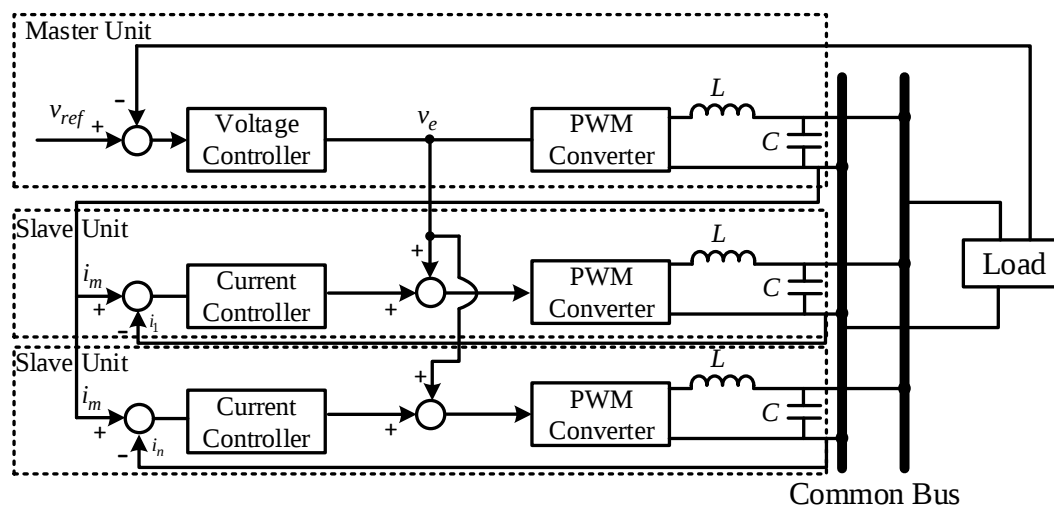
شکل (۲-۴): استراتژی کنترل متمرکز [۲۶].

۲-۶-۲- کنترل رئیس-مرئوس

در استراتژی کنترل رئیس-مرئوس، از حلقه‌های کنترل جریان و ولتاژ استفاده می‌شود و ماژول‌های کنترل اینورترها، به طور مشترک با یکدیگر وظیفه کنترل ریزشبه را انجام می‌دهند. شکل (۲-۵) طرح کنترل ریزشبه مبتنی بر رئیس-مرئوس^۱ را نشان می‌دهد. یک اینورتر به عنوان رئیس عمل می‌کند و فقط حلقه کنترل ولتاژ دارد و حلقه کنترل جریان در ماژول کنترل واحد رئیس وجود ندارد. اینورتر این واحد، جریان‌های گذرا را تامین می‌کند و وظیفه اصلاح خطای تقسیم جریان را برعهده می‌گیرد. همچنین، تنظیم ولتاژ ریزشبه و تعیین جریان مرجع برای واحدهای مرئوس به منظور تقسیم صحیح جریان بین واحدها در ماژول کنترل مربوط به اینورتر رئیس انجام می‌شود. در این شرایط، به دلیل وجود خطوط مخابراتی بین واحدهای مرئوس با واحد رئیس، نیازی به PLL برای همگام‌سازی وجود ندارد.

^۱ Master/Slave

طرح این روش کنترلی، ساده است و تقسیم جریان بین واحدها با دقت بالایی انجام می‌شود. با این وجود، به دلیل اینکه با وقوع مشکل برای اینورتر رئیس، عملکرد ریزشبهه با اختلال مواجه می‌شود، از قابلیت اطمینان کنترل ریزشبهه کاسته می‌شود. بعلاوه، اینورترهای مرئوس پاسخ‌های دینامیکی کندی دارند و در این شرایط اینورتر رئیس به‌ناچار باید بتواند جریان‌های گذرای بزرگی را تامین کند. همچنین، یک ضعف بزرگ دیگر این روش، نیاز به خطوط ارتباطی با پهنای باند بزرگ برای کنترل جریان و ولتاژ ریزشبهه می‌باشد [۲۸-۳۰].



شکل (۲-۵): استراتژی کنترل رئیس/مرئوس [۳۰].

۲-۶-۳- کنترل بر اساس مشخصه افتی

کنترل اینورترهای موازی در ریزشبهه‌های جزیره‌ای عموماً مبتنی بر روش مشخصه افتی است. در این طرح کنترلی، نیازی به خطوط مخابراتی وجود ندارد. در نتیجه، از هزینه‌های بالا و پیچیدگی استفاده از خطوط مخابراتی صرف‌نظر می‌شود. بعلاوه، توسعه شبکه با افزودن منابع جدید به سادگی امکان‌پذیر می‌شود. جدول (۲-۱) مقایسه بین طرح‌های کنترلی مبتنی بر خطوط مخابراتی و طرح‌های کنترلی مبتنی بر مشخصه افتی را نشان می‌دهد.

با توجه به منحنی مشخصه‌های افتی ولتاژ و فرکانس در یک ژنراتور سنکرون که در آن توان اکتیو با فرکانس و توان راکتیو با ولتاژ رابطه دارد، دیده می‌شود که با افزایش توان اکتیو خروجی، فرکانس

کاهش می‌یابد و با افزایش توان راکتیو خروجی ژنراتور، ولتاژ کاهش می‌یابد. در یک ریزشبه، هر واحد DG مبتنی بر اینورتر، با استفاده از تکنیک مشخصه افقی، عملکرد ژنراتور سنکرون را شبیه‌سازی می‌کند. روابط مربوط به مشخصه افقی برای هر اینورتر بر مبنای قابلیت‌های سیستم تولید آن واحد و همچنین وضعیت ریزشبه تعیین می‌شوند.

جدول (۱-۲): مزایا و معایب طرح‌های کنترل توان [۳۱].

معایب	مزایا	طرح کنترلی تقسیم توان مبتنی بر
- افزایش هزینه و پیچیدگی - کاهش قابلیت اطمینان در اثر قطع ارتباط - نیاز به تعریف استانداردهای امنیتی	- بازدهی بالاتر - تنظیم بهتر ولتاژ و فرکانس - تبادل داده با سایر منابع با تاخیر کمتر	خطوط مخابراتی
- وابستگی تقسیم توان اکتیو و راکتیو به یکدیگر - وابستگی دقت عمل به دستگاه‌های اندازه‌گیری محلی - نیازمند به حلقه‌های کنترلی دیگر برای کاهش خطای حالت ماندگار	- منابع می‌توانند دور از هم باشند - هزینه کمتر در اثر حذف خطوط ارتباطی - قابلیت اطمینان بیشتر	تکنیک مشخصه افقی

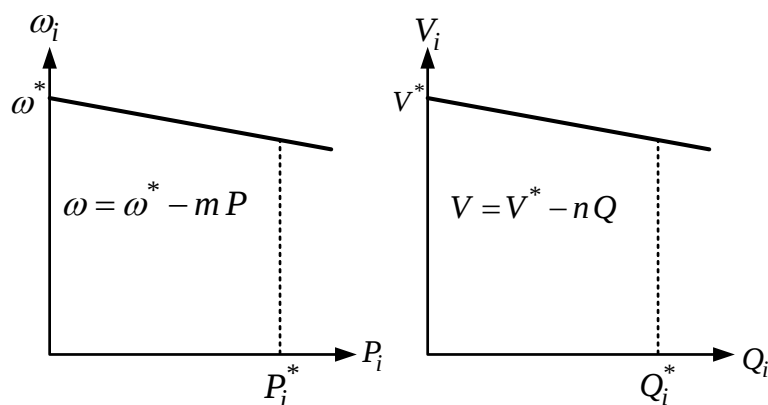
مشخصه افقی متداول

در خطوط فشار قوی و فشار متوسط، عموماً می‌توان از خاصیت اهمی خط در مقابل خاصیت سلفی خط صرف‌نظر کرد. مشخصه‌های افقی ژنراتور سنکرون در این شرایط تعریف می‌شوند. به عبارت دیگر، چنانچه در یک ریزشبه، امپدانس خطوط دارای خاصیت القایی خالص باشند، توان اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبه به صورت روابط (پ-۱۰) و (پ-۱۱) در پیوست ۱ خواهند بود. در این شرایط با توجه به روابط (پ-۱۲) و (پ-۱۳)، از روابط (۱-۲) و (۲-۲) برای تقسیم توان اکتیو و راکتیو استفاده می‌شود که به آن‌ها مشخصه افقی متداول گفته می‌شود:

$$\omega = \omega^* - mP \quad (۱-۲)$$

$$V = V^* - nQ \quad (۲-۲)$$

در این روابط P و Q مقادیر توان اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشکه هستند. ω^* و V^* نیز مقادیر نامی فرکانس زاویه‌ای و اندازه ولتاژ هستند. همچنین ω و V مقادیر مرجع و m و n نیز شیب منحنی‌های مشخصه افقی می‌باشند. متناظر با روابط مشخصه افقی متداول، منحنی‌های مشخصه افقی در شکل (۶-۲) آمده‌اند.



شکل (۶-۲): منحنی‌های مشخصه افقی متداول [۲۵].

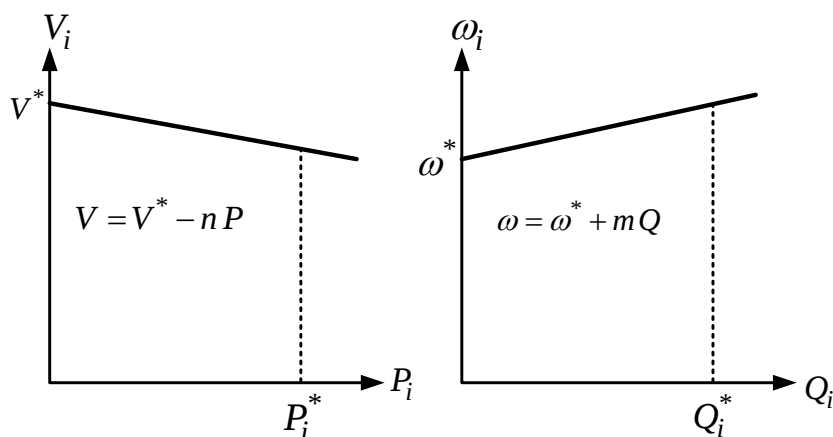
مشخصه افقی مخالف

در شبکه‌های ولتاژ پایین، خاصیت سلفی امپدانس خطوط در مقایسه با خاصیت اهمی آنها، قابل صرف‌نظر کردن هستند. با توجه به روابط (پ-۱۴) و (پ-۱۵) در پیوست ۱، برای محاسبه توان‌های اکتیو و راکتیو در شرایطی که امپدانس خطوط خاصیت اهمی دارند و ملاحظه روابط (پ-۱۶) و (پ-۱۷) در پیوست ۱، برای تقسیم توان از روابط زیر با عنوان مشخصه افقی مخالف، استفاده می‌شود [۳۲]:

$$\omega = \omega^* + mQ \quad (۳-۲)$$

$$V = V^* - nP \quad (۴-۲)$$

همانطور که از روابط معلوم است، تغییرات ولتاژ به طور معکوس با تغییرات توان اکتیو متناسب است و تغییرات فرکانس نیز متناسب با تغییرات توان راکتیو می‌باشد. بنابراین شکل (۷-۲) حاصل می‌شود.



شکل (۷-۲): منحنی‌های مشخصه مخالف [۲۵].

مشخصه افقی در ریزش‌بکه با امپدانس خطوط اهمی-سلفی

در این حالت، هم اثر سلفی و هم اثر اهمی خط در نظر گرفته می‌شود و زاویه امپدانس خط بین صفر و ۹۰ درجه خواهد بود. در این شرایط، نمی‌توان روابط مجزایی مشابه حالت‌های قبلی برای تقسیم توان اکتیو و راکتیو در نظر گرفت، در نتیجه، از مشخصه افقی با روابط زیر استفاده می‌شود [۳۲]:

$$\omega = \omega^* - mP + nQ \quad (۵-۲)$$

$$V = V^* - mP + nQ \quad (۶-۲)$$

بر مبنای روابط فوق مشاهده می‌گردد که تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو هم منجر به تغییرات در فرکانس و هم منجر به تغییرات در ولتاژ می‌شود.

۷-۲- بهبود عملکرد مشخصه افقی

همانطور که بخش قبلی بررسی شد، روابط ریاضی توصیف‌کننده عملکرد مشخصه افقی در شرایط مختلف ریزش‌بکه، متفاوت هستند. با وجود سادگی ایده مشخصه افقی و عدم نیاز به خطوط مخابراتی و فراهم کردن قابلیت “نصب و اجرا” در ریزش‌بکه، این روش دارای معایبی نیز می‌باشد.

- در شرایط عدم استفاده از خطوط ارتباطی، عملکرد تقسیم توان اکتیو یا راکتیو (بسته به وضعیت امپدانس خطوط) از دقت کافی برخوردار نخواهد بود.
- نوسانات ولتاژ و فرکانس با استفاده از روابط مربوط به مشخصه افقی اجتناب ناپذیر است.

- در شرایطی که امپدانس خطوط برابر نیستند، دقت عملکرد این روش به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار می‌گیرد و خطای تقسیم توان قابل توجهی ایجاد می‌شود.

برای بهبود عملکرد روش مشخصه اف‌تی برای کنترل تقسیم توان در ریزشبکه، در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی انجام شده است. روش‌های ارائه شده در این راستا را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۷-۱- افزودن عبارات جبرانسازی

در این تکنیک، عبارات ریاضی‌ای به روابط مشخصه اف‌تی افزوده می‌شود که عملکرد نامطلوب روش مشخصه اف‌تی را می‌توانند اصلاح کند. در این راستا، طرح کنترلی ارائه شده در مرجع [۳۳] در شکل (۲-۸) نشان داده شده است. روابط پیشنهادی برای کنترل تقسیم توان در زیر آمده است:

$$\omega = m(P^* - P) + k_d \frac{d}{dt}(P^* - P) \quad (2-7)$$

$$V = n(Q^* - Q) + k_i \int (Q_g^* - Q_g) dt \quad (2-8)$$

که P^* و Q^* به ترتیب مقادیر مرجع توان‌های اکتیو و راکتیو هستند. Q_g و Q_g^* به ترتیب، مقادیر مرجع و واقعی توان راکتیو تزریقی به شبکه است. k_d و k_i هم ضرایب عبارات ریاضی مشتق و انتگرال هستند.

در مرجع [۳۴]، روابط مشخصه اف‌تی به صورت روابط زیر ارائه شدند:

$$\omega = \omega^* - mP + r nQ \quad (2-9)$$

$$V = V^* - nQ - r mP - V_{vi} \quad (2-10)$$

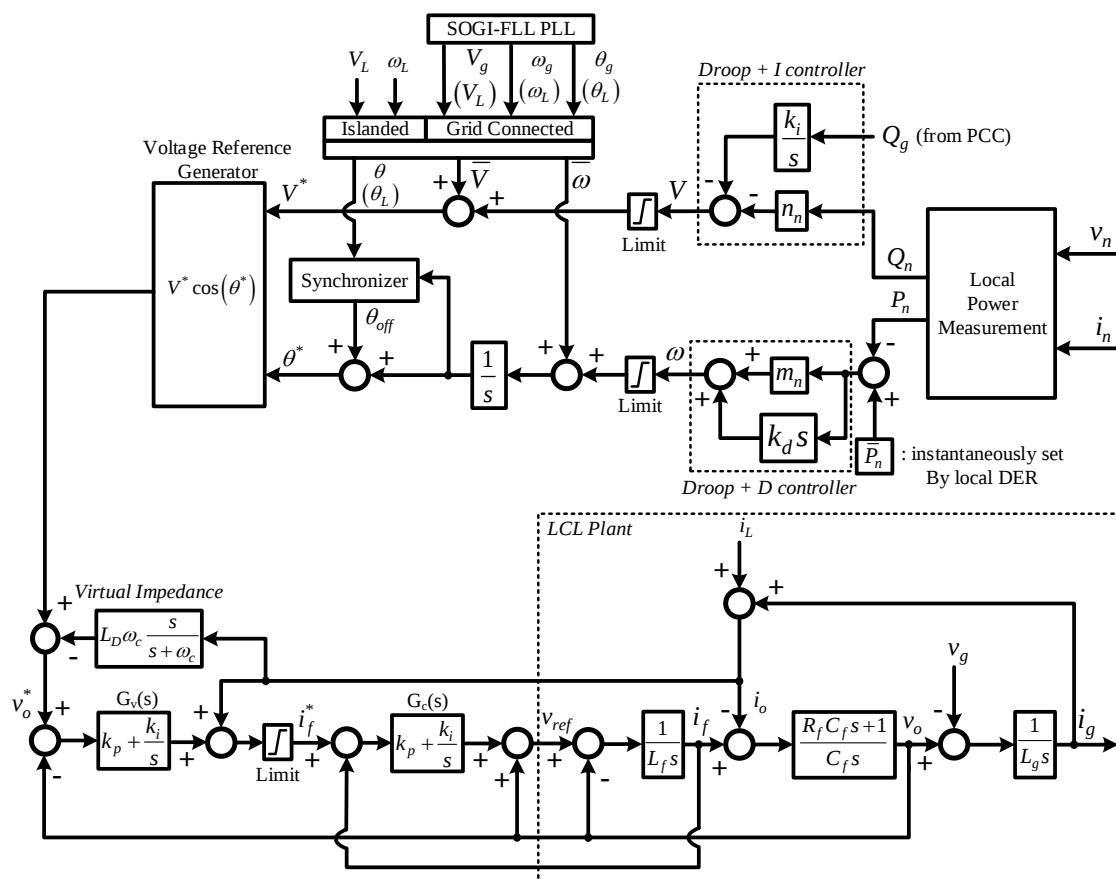
که r برابر با نسبت R/X در امپدانس خطوط است. همچنین V_{vi} عبارت جبران‌سازی است.

در مرجع [۳۵] یک طرح کنترل بر اساس روابط (۲-۱۱) و (۲-۱۲) با عبارت جبران‌کننده در رابطه مربوط به کنترل ولتاژ ارائه شده است که می‌تواند برای کنترل ریزشبکه با امپدانس‌های خطوط متفاوت به کار رود:

$$\omega = \omega^* + mQ \quad (۱۱-۲)$$

$$V = E^* - \frac{nP}{K_e E^*} E^* \quad (۱۲-۲)$$

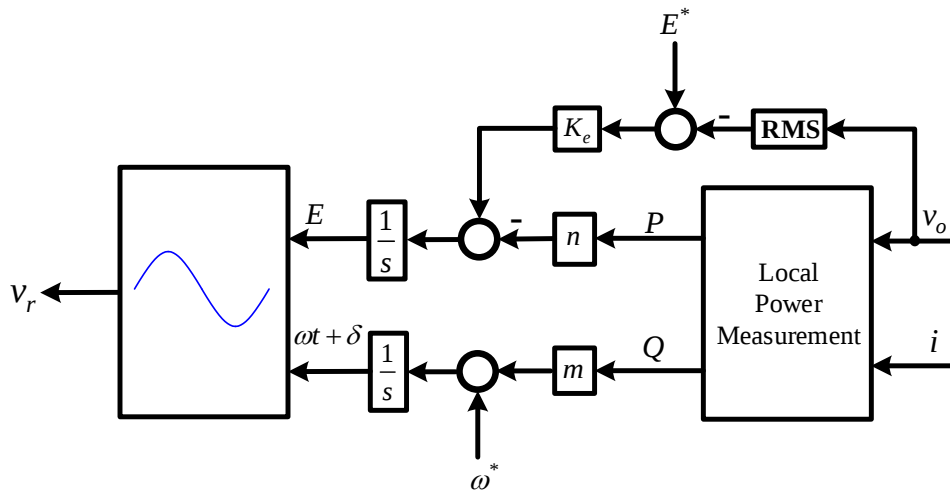
n نسبت افت ولتاژ است. همچنین E^* دامنه ولتاژ مرجع برای باس مشترک و K_e ضریب تصحیح هستند که برای تمامی اینورترها یکسان انتخاب می‌شود. طرح کنترلی پیشنهادی مرجع [۳۵] در شکل (۹-۲) آمده است. در این روش با افزودن یک مسیر پسخور برای کنترل ولتاژ در رابطه مشخصه افتی توان اکتیو - ولتاژ، عملکرد سیستم کنترل بهبود یافته است.



شکل (۸-۲): استفاده از عبارات جبران‌سازی برای بهبود عملکرد روش مشخصه افتی در مرجع [۳۳].

۲-۷-۲- تغییر پارامتر

یکی دیگر از ایده‌های بهبود عملکرد روش مشخصه افتی برای کنترل تقسیم جریان در ریزشکله‌های جزیره‌ای، استفاده از متغیرهای دیگر در روابط اساسی مشخصه افتی است. به عبارت دیگر، کنترل متغیرهای اصلی ریزشکله (ولتاژ و فرکانس)، به طور غیرمستقیم و با کنترل متغیرهای دیگر انجام شود.



شکل (۲-۹): استفاده از عبارات جبران سازی برای بهبود عملکرد روش مشخصه افی در مرجع [۳۵].

در مراجع [۳۶-۳۷] پیشنهاد شده است که به جای استفاده از متغیر فرکانس، از متغیر اختلاف زاویه‌ای بین فازورهای ولتاژهای خروجی اینورتر و باس مشترک به صورت روابط زیر استفاده شود:

$$\delta = \delta^* - m(P - P^*) \quad (۲-۱۳)$$

$$V = V^* - n(Q - Q^*) \quad (۲-۱۴)$$

که δ اختلاف زاویه‌ای است. بالانویس $*$ در متغیرها اشاره به مقادیر مرجع دارد. در این شرایط، تقسیم توان اکتیو با دقت بالایی انجام می‌شود. بعلاوه از انحرافات فرکانس نیز جلوگیری می‌شود. برای تنظیم مقدار مرجع اختلاف زاویه‌ای از GPS^۱ استفاده می‌شود.

در مرجع [۳۸]، از مشخصه افی $Q - \dot{V}$ برای کنترل ولتاژ و تقسیم توان راکتیو به صورت روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\dot{V}_x = \dot{V}_{0x} - n(Q_{0x} - Q_x) \quad (۲-۱۵)$$

$$V_x^* = V_{0x} + \int_t \dot{V}_x d\tau \quad (۲-۱۶)$$

که $\dot{V}$ مشتق ولتاژ، n_x ضریب مشخصه افی $\dot{V}$ است. همچنین، $\dot{V}_{0x}$ مقدار نامی $\dot{V}$ که برابر با صفر است. Q_{0x} مقدار توان راکتیو در نقطه تنظیم منحنی مشخصه افی به ازای مقدار نامی $\dot{V}$ است که

^۱ Global Positioning System

متناسب با ظرفیت تولید توان راکتیو واحد DG، تعیین می‌شود. بعلاوه، V_{0x} مقدار نامی دامنه ولتاژ فاز و V_x^* مقدار سیگنال فرمان برای دامنه ولتاژ خروجی اینورتر است. در شرایط نامی، برای جلوگیری از تغییرات ولتاژ خروجی، V_x^* باید به مقدار صفر بازنشانی شود. به همین علت از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{d}{dt} Q_{0x} = K_{res} Q_{Rx} (\dot{V}_{0x} - \dot{V}_x) \quad (17-2)$$

که K_{res} بهره بازنشانی^۱ $\dot{V}$ و Q_{Rx} وابسته به ظرفیت واحد DG است. بنابراین عملکرد صحیح این روش، تحت تاثیر کیفیت عملکرد مکانیسم بازنشانی^۲ است.

به منظور بهبود عملکرد مکانیسم بازنشانی، استراتژی کنترل بهبودیافته مبتنی بر مشخصه افقی $Q-\dot{V}$ در مرجع [۳۹] ارائه شده است که برای بازنشانی $\dot{V}$ در حالت دائم از رابطه زیر استفاده می‌کند:

$$\frac{d}{dt} Q_{0x} = -K_{res} Q_{Rx} (\dot{V}_x - \dot{V}_{0x}) + n_d \frac{d}{dt} Q_x \quad (18-2)$$

در واقع افزودن عبارت $n_d \frac{d}{dt} Q_x$ عملکرد مکانیسم بازنشانی را ارتقا می‌دهد.

با توجه به اینکه راهکار استفاده از مشخصه افقی $Q-\dot{V}$ برای ریزشبه‌های با امیدانس خط کاملاً سلفی طراحی شده است، در مرجع [۴۰]، روش مبتنی بر مشخصه افقی $P-\dot{V}$ برای ریزشبه‌های جزیره‌ای که در سطح ولتاژ پایین کار می‌کنند، پیشنهاد شده است که با روابط زیر توصیف می‌شود:

$$\dot{V}_o = m(P'_o - P) \quad (19-2)$$

$$V = V^* + S_p \cdot \int_t \dot{V}_o d\tau \quad (20-2)$$

$S_p > 1$ ضریب تناسب مکانیسم بازنشانی، P'_o نقطه تنظیم توان اکتیو و V^* مقدار ولتاژ نامی هستند.

در مرجع [۴۱] از زاویه فازور ولتاژ خروجی اینورتر برای تقسیم توان اکتیو استفاده می‌شود. روابط

مشخصه افقی در این مرجع به صورت روابط (۲۱-۲) تا (۲۳-۲) هستند:

¹ Restoration gain

² Restoration Mechanism

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}^* - mP + m^* \frac{dP}{dt} + \Delta \mathcal{G} \quad (21-2)$$

$$dV = dV^* + n(Q^* - Q) \quad (22-2)$$

$$V = V^* + V_{com} + \int \Delta V dt + n^* \frac{dQ}{dt} \quad (23-2)$$

که $\mathcal{G}$ زاویه فازور ولتاژ خروجی اینورتر، $\Delta \mathcal{G} = \mathcal{G} - \mathcal{G}_{ave}$ و $\mathcal{G}_{ave}$ متوسط زاویه فازورهای ولتاژهای خروجی تمامی اینورترها هستند. dV نرخ تغییرات دامنه فازور ولتاژ خروجی اینورتر است. همچنین، dV^* مقدار نامی برای dV است که برابر با صفر تنظیم می‌شود. همچنین، Q^* مقدار توان راکتیو در نقطه کار به ازای dV^* می‌باشد که به ظرفیت نامی اینورتر بستگی دارد.

۲-۷-۳- امپدانس مجازی

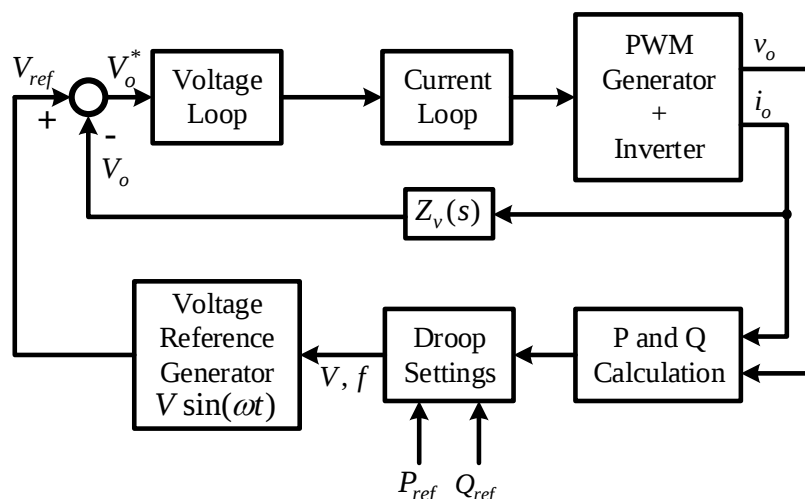
در شرایطی که امپدانس خطوط واسط بین اینورتر و باس مشترک، برابر نباشند، تقسیم توان مورد نیاز بار، به درستی بین واحدهای DG انجام نمی‌شود. در این شرایط، ایده امپدانس مجازی، با توجه به اینکه باعث افزایش تلفات نمی‌شود، بسیار کارآمد به حساب می‌آید. به طور کلی امپدانس مجازی مزایای زیر را به ارمغان می‌آورد [۲۸] و [۴۲]:

- مجزاسازی حلقه کنترل توان اکتیو و راکتیو با تنظیم نسبت X/R
- بهبود دقت تقسیم توان با تنظیم پویای افت ولتاژ در امپدانس خط
- بهبود میرایی مودهای نوسانی

امپدانس مجازی در مسیر پسخور حلقه کنترل ولتاژ به صورت شکل (۲-۱۰) اعمال می‌شود. بدین ترتیب، ولتاژ مرجع v_{ref} با رابطه (۲-۲۴) محاسبه خواهد شد:

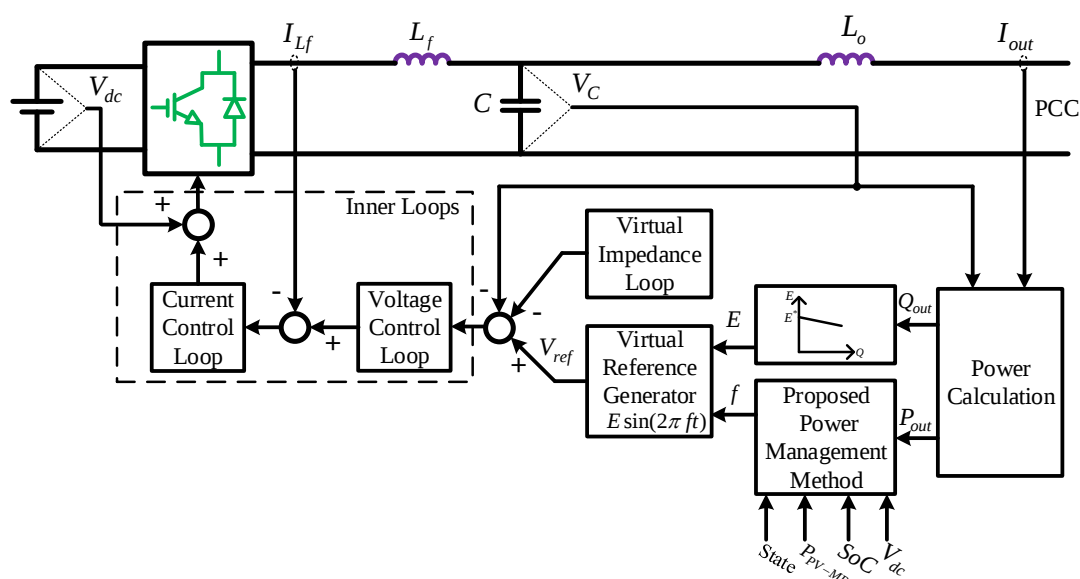
$$v_{ref} = v_o^* - Z_v(s) i_o \quad (24-2)$$

که $Z_v(s)$ امپدانس مجازی، i_o جریان تزریقی به باس مشترک و v_o^* ولتاژ خروجی اینورتر در شرایط بی باری است.



شکل (۲-۱۰): اعمال تکنیک امپدانس مجازی در حلقه کنترل ولتاژ [۲۸].

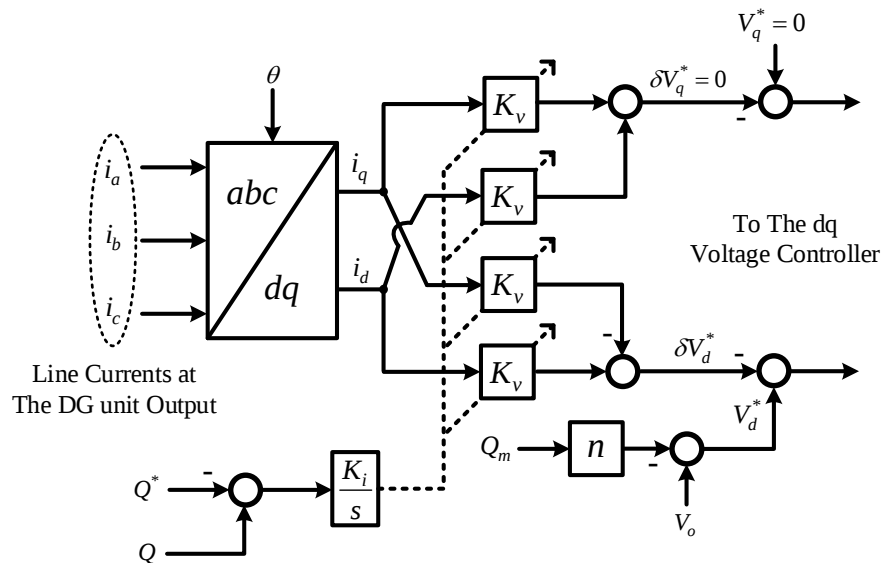
در این راستا، در مقاله [۴۳]، کنترل توان با استفاده از مشخصه افقی در یک ریزشبهه جزیره‌ای و متشکل از واحدهای DG مبتنی بر سیستم فتوولتائیک، واحدهای ذخیره‌ساز باتری مبتنی بر امپدانس مجازی، انجام شده است. از نقاط قوت این روش، عدم نیاز به ارتباط بین واحدها می‌باشد و همچنین سطح شارژ باتری‌ها نیز به عنوان یکی از عناصر کنترلی مدنظر قرار گرفته است. برای کنترل ریزشبهه در وضعیت‌های مختلف عناصر ولتاژ، توان اکتیو، توان راکتیو و فرکانس مدنظر قرار گرفته‌اند. بلوک دیاگرام این سیستم کنترلی در شکل (۲-۱۱) آمده است و پارامترهای ورودی سیستم مدیریت توان در آن مشخص شده‌اند که عبارت‌اند از میزان تولید واحدهای خورشیدی، سطح شارژ باتری‌ها، وضعیت



شکل (۲-۱۱): بلوک دیاگرام حالت کنترلی توان اکتیو-توان راکتیو در مرجع [۴۳].

کاری ریزشبكة و ولتاژ dc مبدل‌های توان. از نقاط ضعف این استراتژی کنترلی این است که اثر تغییرات توان راکتیو در تقسیم توان به عنوان یک پارامتر تاثیرگذار مدنظر قرار نگرفته است.

در مرجع [۴۴]، امپدانس مجازی به صورت انتگرال خطای توان راکتیو محاسبه شده است و در حلقه کنترل ولتاژ اعمال می‌شود. شکل (۲-۱۲) طرح کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد؛ مقاومت و اندوکتانس مجازی برابر با یکدیگر در نظر گرفته شده است.



شکل (۲-۱۲): بلوک دیاگرام طرح کنترلی امپدانس مجازی تطبیقی در حلقه کنترل ولتاژ [۴۴].

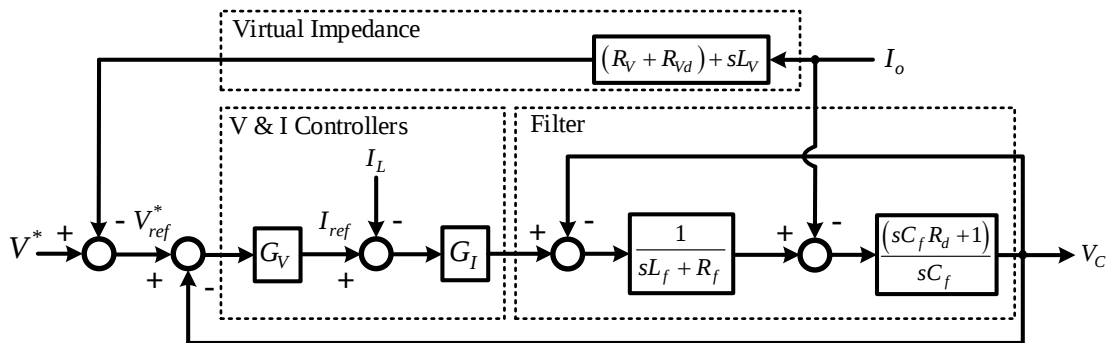
در مقاله [۴۵]، از امپدانس مجازی به صورت شکل (۲-۱۳) در حلقه کنترل ولتاژ استفاده می‌کند. امپدانس مجازی در این مقاله از سه بخش تشکیل شده است که شامل X_V^* راکتانس مجازی، R_V مقاومت مجازی و R_{Vd} مقاومت مجازی میراکننده است و به طور تطبیقی با روابط (۲-۲۵) و (۲-۲۶) محاسبه می‌شوند:

$$X_V^* = (Q^* - Q)(K_{pXV} + K_{iXV} / s) \quad (2-25)$$

$$R_V = (-1)(Q^* - Q)(K_{pRV} + K_{iRV} / s) \quad (2-26)$$

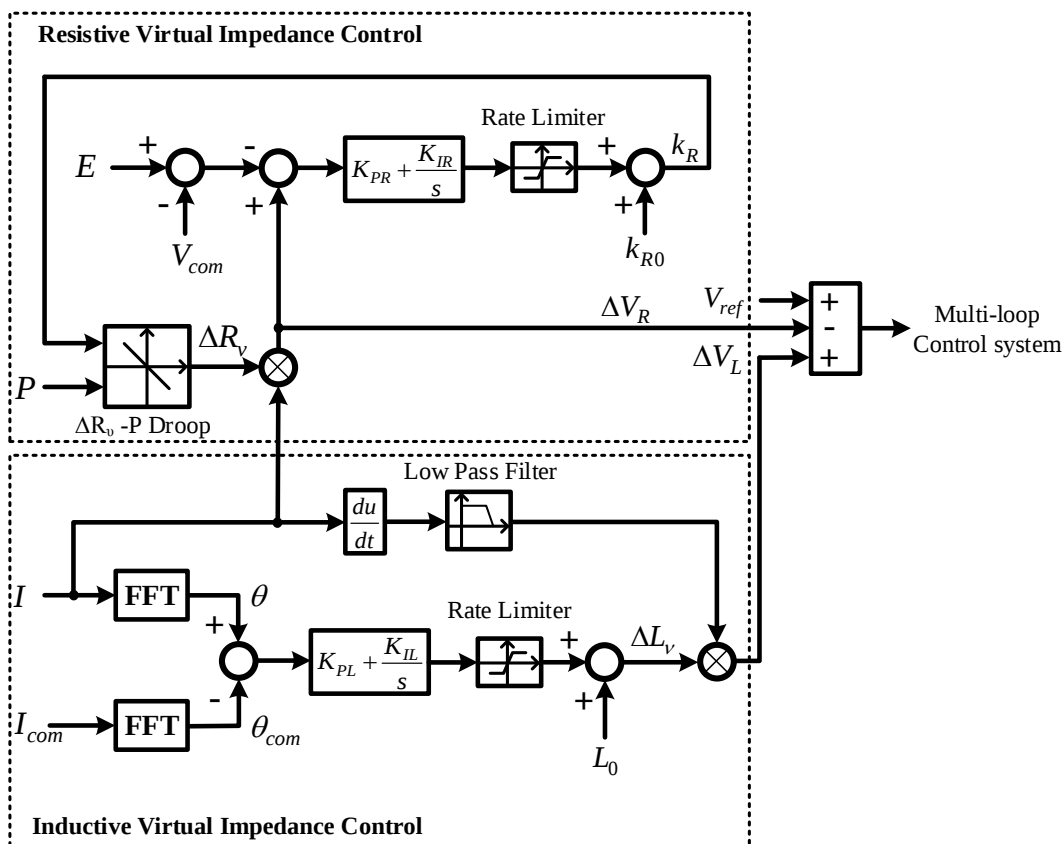
$$R_{Vd} = (P^* - P)(K_{iRd} / s) \quad (2-27)$$

پارامترهای امپدانس مجازی از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی استفاده می‌شود. به عبارت دیگر برای تنظیم ضرایب کنترل‌کننده‌ها هستند. به عبارت دیگر برای تنظیم



شکل (۲-۱۳): بلوک دیاگرام طرح کنترلی امپدانس مجازی تطبیقی در حلقه کنترل ولتاژ [۴۵].

مقاله [۴۶]، یک طرح کنترلی مبتنی بر مشخصه افقی متداول، برای کنترل ریزشکبه جزیره‌ای ارائه داده است که در آن اثرات اهمی و اندوکتانس خطوط تغذیه در نظر گرفته شده است. بعلاوه برای بهبود دقت تقسیم توان راکتیو و همچنین کاهش جریان گردشی، از ایده امپدانس مجازی استفاده کرده است که در شکل (۲-۱۴) نشان داده شده است. ΔR_v و ΔL_v به ترتیب، مقاومت و اندوکتانس مجازی هستند. ΔR_v برای تنظیم دامنه ولتاژ و ΔL_v برای تنظیم زاویه ولتاژ خروجی اینورتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.



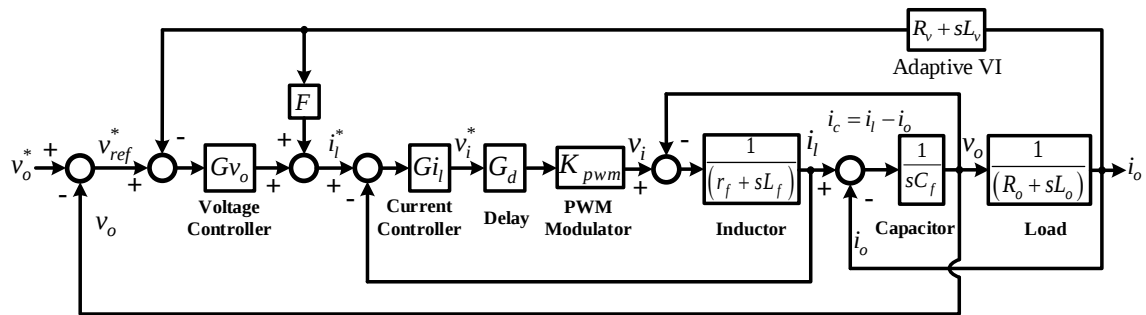
شکل (۲-۱۴): طرح کنترل مبتنی بر امپدانس مجازی در [۴۶].

در مرجع [۴۷] نیز از ایده امپدانس مجازی برای بهبود کنترل تقسیم توان بهره برده شده است. شکل (۲-۱۵) حلقه کنترل ولتاژ و جریان را نشان می‌دهد. در این مقاله، طرح پیشنهادی هم برای مشخصه افتی متداول و هم برای مشخصه افتی مخالف، ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود یک مسیر پیشخور^۱ برای امپدانس مجازی در حلقه کنترل جریان نیز در نظر گرفته شده است تا کنترل اغتشاشات جریان بهبود یابد. چنانچه از مشخصه افتی متداول استفاده شود، مقاومت و اندوکتانس مجازی با روابط زیر تنظیم می‌شوند:

$$r_v = R_v - xi i_{oq} \quad (2-28)$$

$$x_v = X_v + yi_{od} \quad (2-29)$$

که r_v و x_v به ترتیب مقاومت و اندوکتانس مجازی برای مشخصه افتی متداول هستند. همچنین R_v و X_v هم به ترتیب، مقادیر نامی مقاومت و اندوکتانس مجازی هستند. بعلاوه، x و y بهره‌های تغییرات تطبیقی امپدانس مشخصه افتی هستند. i_{od} و i_{oq} نیز متغیرهای جریان‌های تزریقی به باس مشترک در قاب مرجع سنکرون هستند.



شکل (۲-۱۵): طرح کنترل مبتنی بر امپدانس مجازی در [۴۷].

در صورتی که از مشخصه افتی مخالف استفاده شود، مقاومت و اندوکتانس مجازی برای مشخصه افتی، با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$r_v = R_v + xi i_{oq} \quad (2-30)$$

$$x_v = X_v - yi_{od} \quad (2-31)$$

^۱ Feed-Forward

۲-۸- مقایسه استراتژی‌های مختلف و بیان چشم‌انداز کار اصلی

۲-۸-۱- ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های تقسیم توان

به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد تکنیک‌های ارائه شده در راستای بهبود عملکرد تکنیک مشخصه اف‌تی، در جدول (۲-۲) مزایا و معایب این استراتژی‌های کنترل مختلف ارائه شده است. در ساختار این روش‌ها، دقت تقسیم توان بین واحدهای DG با استفاده از اصلاح تکنیک مشخصه اف‌تی بهبود می‌یابد. همچنین برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی، از یک ساختار کنترل شامل حلقه بیرونی کنترل ولتاژ و حلقه درونی کنترل جریان، استفاده می‌شود. در نتیجه استفاده از روابط مرتبط با تبدیل قاب مرجع و تعداد زیادی کنترل کننده نیاز خواهد بود. بعلاوه، عملکرد موثر روش کنترل تحت تاثیر کنترل کننده مورد استفاده در حلقه کنترل داخلی می‌باشد. سرانجام با مدولاسیون پهنای باند، سیگنال‌های کلیدزنی تولید خواهند شد. بنابراین، علاوه بر معایب اشاره شده در جدول (۲-۲)، ساختار طرح کنترلی پیچیده خواهد بود و تلاش زیاد برای تنظیم ضرایب کنترل کننده‌ها (که عموماً از نوع تناسبی-انتگرالی هستند) مورد نیاز است. همچنین، طرح‌های ارائه شده در مقالات مختلف معمولاً بر روی اصلاح یکی از روابط مرتبط با مشخصه اف‌تی متمرکز می‌شوند که این امر سبب می‌شود که انحرافات ولتاژ و فرکانس به طور همزمان اصلاح نشوند.

۲-۸-۲- چشم‌انداز کار اصلی رساله

برای غلبه بر این مشکلات، یک طرح کنترلی مبتنی بر مشخصه اف‌تی شار مجازی در مرجع [۷] ارائه شده است که در آن، از یک متغیر جدید با عنوان شار مجازی استفاده می‌شود که انتگرال ولتاژ تعریف شده است. برای کنترل تقسیم توان اکتیو و راکتیو از مشخصه اف‌تی با روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\delta = \delta_n - m(P_n - P) \quad (۳۲-۲)$$

$$|\psi_V| = |\psi_V|_n - n(Q_n - Q) \quad (۳۳-۲)$$

در این روابط، δ و $|\psi|$ به ترتیب زاویه و اندازه بردار شار مجازی هستند که بر مبنای مشخصه اف‌تی با

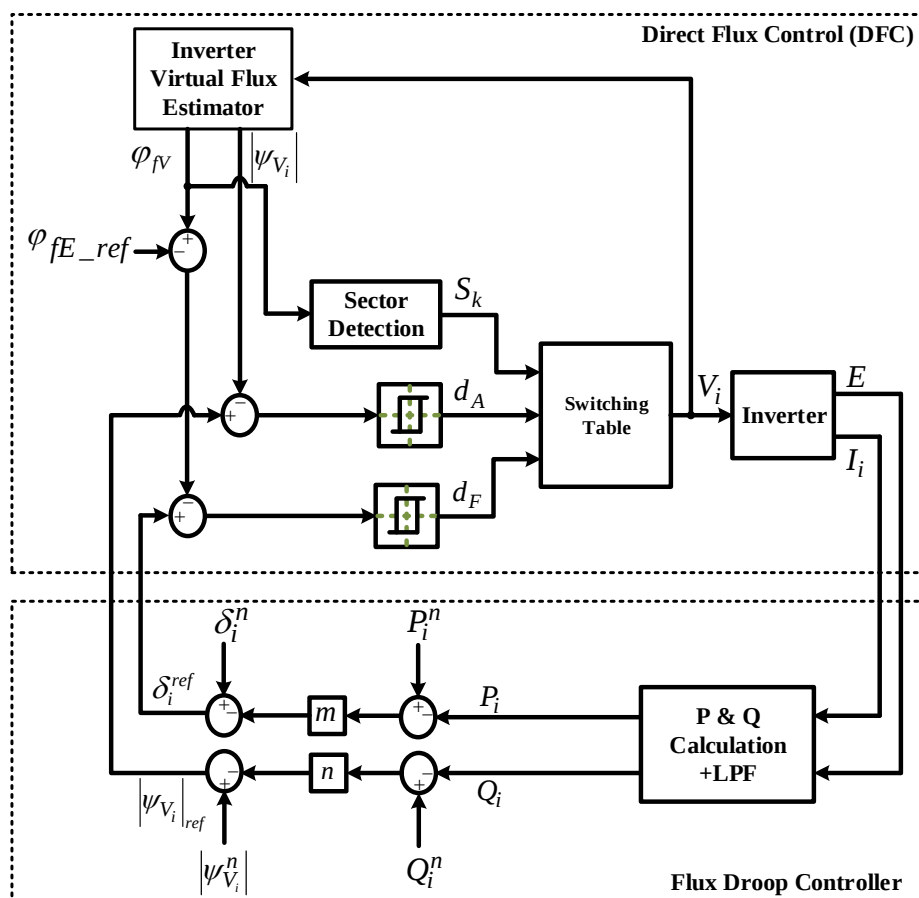
جدول (۲-۲): مزایا و معایب استراتژی‌های مختلف برای بهبود عملکرد روش مشخصه افتی.

مقاله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
[۳۳]	✓			✓			✓			✓
[۳۴]	✓				✓	✓	✓			✓
[۳۵]	✓			✓						
[۳۶]		✓			✓					
[۳۷]		✓		✓	✓					
[۳۸]		✓		✓				✓		
[۳۹]		✓						✓		
[۴۰]		✓		✓				✓		
[۴۱]		✓			✓			✓		
[۴۲]			✓							
[۴۳]			✓	✓						✓
[۴۴]			✓	✓		✓				
[۴۵]			✓	✓			✓			✓
[۴۶]			✓			✓				
[۴۷]			✓	✓			✓			✓

راهنما: ۱: افزودن عبارات جبرانسازی، ۲: تغییر پارامتر، ۳: امپدانس مجازی، ۴: بهبود کنترل ولتاژ، ۵: بهبود کنترل فرکانس، ۶: بهبود تقسیم توان، ۷: وابستگی به پارامتر خط، ۸: وابستگی به شرایط اولیه، ۹: نیاز به تخمین پارامتر، ۱۰: نوسان فرکانس.

توان‌های اکتیو و راکتیو رابطه دارند، m و n نیز شیب مربوط به مشخصه‌افتی زاویه فاز-توان اکتیو و شار مجازی-توان راکتیو می‌باشند، δ_n و $|\psi_V|_n$ نیز مقادیر نامی زاویه و اندازه شار مجازی هستند. بر مبنای این روابط بلوک دیاگرام سیستم کنترلی به صورت شکل (۲-۱۶) در می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تقسیم توان بر اساس مشخصه افتی شار مجازی انجام می‌شود. همچنین از تکنیک کنترل مستقیم شار مجازی برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی بهره برده می‌شود. بدین ترتیب، نیازی به کنترل‌کننده‌های PI نخواهد بود و از مدولاسیون پهنای پالس نیز استفاده نمی‌شود. در نتیجه ساختار طرح کنترلی ساده‌ای حاصل می‌شود. با این حال، این روش، دارای معایب ذیل است:

- در شرایط نابرابر بودن امپدانس خطوط، تقسیم توان به درستی انجام نمی‌شود.
- این طرح کنترلی با فرض اندوکتانسی بودن امپدانس خطوط طراحی شده است.
- استفاده از کنترل‌کننده هیستریزیس باعث متغیر بودن فرکانس کلیدزنی می‌شود.



شکل (۲-۱۶): کنترل تقسیم توان با استفاده از تکنیک مشخصه افتی مبتنی بر شار مجازی [۷].

با توجه به مزایای روش مشخصه افی شار مجازی، در این پژوهش از این تکنیک برای کنترل توان در ریزشبهک جزیره‌ای بهره برده می‌شود. در این رساله، سه طرح کنترلی بهبودیافته ارائه می‌شود که با استفاده از آن‌ها می‌توان معایب این استراتژی کنترلی را اصلاح کرد. طرح‌های کنترلی ارائه شده در این رساله ویژگی‌های ذیل را ارائه می‌کنند:

- امکان تقسیم توان صحیح و متناسب بین منابع تولید انرژی الکتریکی در شرایط نابرابری امپدانس خطوط.

- ارائه روابط مشخصه افی مبتنی بر شار مجازی در شرایط اهمی بودن امپدانس خطوط.

- ارائه روش‌های کارآمد برای کنترل مبدل نظیر کنترل مدل پیش‌بین شار و همچنین کنترل مستقیم فازی شار.

۲-۹- جمع‌بندی

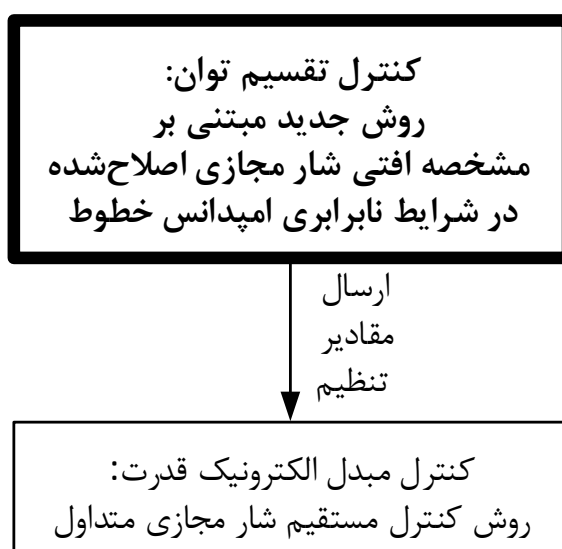
برای کنترل عملکرد و بهبود قابلیت‌های منابع تولید انرژی الکتریکی و همچنین تامین توان مورد نیاز بارها در یک ریزشبهک، ضرورت دارد که از روش‌های نوین برای تقسیم توان و همچنین کنترل مبدل‌های توان، استفاده شود. در این فصل تئوری تقسیم توان و تاثیر امپدانس خط بر روی عملکرد طرح کنترل ریزشبهک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین روش مشخصه افی معرفی شد و عملکرد آن مورد تحلیل قرار گرفت. بعلاوه، با مطالعه معایب این طرح کنترلی، روش‌های ارائه شده در مراجع معتبر برای بهبود عملکرد آن مورد بحث قرار گرفت. در این راستا، یک استراتژی کارآمد برای کنترل ریزشبهک، استفاده از تکنیک مشخصه افی مبتنی بر شار مجازی می‌باشد. با این حال، این طرح کنترلی نیز دارای معایبی است. به همین علت، در فصل‌های آینده تکنیک‌هایی ارائه خواهد شد که توانایی حل مشکلات این استراتژی کنترلی را دارند. سپس با ارائه جزئیات و استفاده از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink و همچنین در صورت امکان، مطالعه نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی در محیط آزمایشگاه، عملکرد آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

فصل سوم:

**استراتژی پیشنهادی برای کنترل توان
بر اساس مشخصه افتی شار مجازی**

۳-۱- مقدمه

همانطور که در فصل قبلی اشاره شد، استراتژی کنترل توان مبتنی بر مشخصه افتی به طور متداول در ریزشبکه‌های جزیره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما این روش دارای معایبی از جمله انحرافات ولتاژ و فرکانس و همچنین دقت پایین در تقسیم توان راکتیو است. برای غلبه بر این مشکلات، روش مشخصه افتی شار مجازی، راهکار موثری به شمار می‌رود. با این وجود، در شرایط نابرابری امپدانس خطوط، این استراتژی نیز عملکرد نامطلوبی در کنترل توان دارد. برای رفع این معضل، راهکاری پیشنهاد شده است که جزئیات آن در این فصل ارائه می‌شود. شکل (۳-۱) ساختار کنترل ریزشبکه ارائه شده در این فصل را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل با قسمت پررنگ نشان داده شده است، نوآوری رساله در این فصل مربوط به بخش کنترل تقسیم توان در استراتژی کنترل ریزشبکه جزیره‌ای می‌شود. برای بخش کنترل مبدل نیز از روش کنترل مستقیم شار مجازی بهره برده می‌شود.



شکل (۳-۱): ساختار ارائه شده در فصل سوم.

ساختار این فصل به شرح ذیل است: ابتدا اساس تکنیک متداول مشخصه افتی شار مجازی (VFD) تشریح می‌شود. سپس، تاثیرات نابرابری امپدانس خطوط در عملکرد کنترل ریزشبکه مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد؛ در ادامه، روابط ریاضی توصیف‌کننده طرح پیشنهادی، ارائه می‌شود و پایداری ریزشبکه از دیدگاه سیگنال کوچک در بخش پنجم تحلیل می‌شود و همچنین

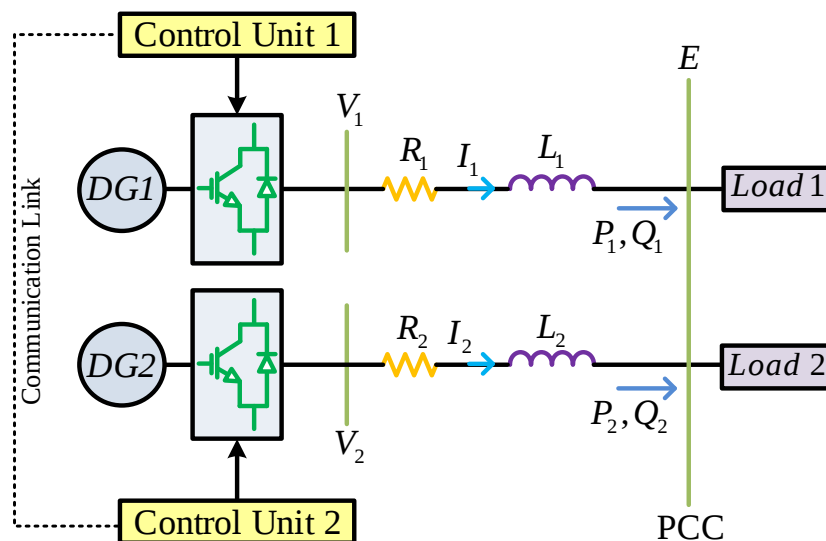
اثر تاخیر زمانی در خطوط ارتباطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتهای این فصل، با تحلیل نتایج شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink در بخش ششم و همچنین نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی در محیط آزمایشگاه در بخش هفتم، عملکرد طرح پیشنهادی ارزیابی می‌شود.

۳-۲- بیان ریاضی روش مشخصه افی مبتنی بر شار مجازی

واحدهای تولید انرژی که از طریق اینورترها با آرایش موازی و باس PCC^1 به یکدیگر و همچنین به بارها متصل هستند، ساختار متداول یک ریزشبه جزیره‌ای را تشکیل می‌دهند. شکل (۳-۲) ساختار این ریزشبه را نشان می‌دهد و برای توصیف عملکرد این ریزشبه با استفاده از قوانین مداری، از روابط ریاضی به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$V_i = R_i I_i + L_i \frac{dI_i}{dt} + E \quad (i = 1, 2) \quad (۱-۳)$$

V_i بردار ولتاژ خروجی اینورتر، I_i جریان تزریقی به PCC ، E بردار ولتاژ PCC هستند. همچنین، R_i و L_i به ترتیب مقاومت و اندوکتانس خط هستند. بعلاوه، زیرنویس " i "، اشاره به شماره اینورتر دارد.



شکل (۳-۲): مدل ساده شده ریزشبه جزیره‌ای.

توانی که اینورتر i به ریزشبه تحویل می‌دهد، از رابطه (۳-۲) محاسبه می‌شود:

¹ Point of Common Coupling

$$S_i = P_i + jQ_i = E \times I_i^* \quad (۲-۳)$$

که S_i ، P_i و Q_i به ترتیب توان مختلط، توان اکتیو و توان راکتیو تزریقی اینورتر i به PCC هستند.

مشابه با تعریف شار مغناطیسی در ماشین‌های الکتریکی، بردارهای شار مجازی اینورتر و PCC به صورت انتگرال ولتاژ در حوزه زمان تعریف می‌شوند [۷]:

$$\psi_i = \int V_i dt = \frac{|V_i|}{\omega} e^{j\varphi_i} \quad (۳-۳)$$

$$\psi_E = \int E dt = \frac{|E|}{\omega} e^{j\varphi_E} \quad (۴-۳)$$

که ψ_i و ψ_E بردارهای شارهای مجازی اینورتر و PCC هستند. به طور مشابه، φ_i و φ_E زوایای آن‌ها هستند. همچنین، بین زوایای بردارهای شار و زوایای بردارهای ولتاژ، روابط ریاضی به صورت زیر برقرار است.

$$\varphi_i = \vartheta_i - \frac{\pi}{2} \quad (۵-۳)$$

$$\varphi_E = \vartheta_E - \frac{\pi}{2} \quad (۶-۳)$$

که ϑ_i و ϑ_E به ترتیب زاویه بردار ولتاژ خروجی اینورتر و زاویه بردار ولتاژ PCC هستند.

به منظور ساده‌سازی، از خاصیت اهمی امپدانس‌های خط صرف‌نظر شده است [۷]. در نتیجه، جریان هر خط را می‌توان با رابطه زیر نوشت:

$$I_i = \frac{1}{L_i} (\psi_i - \psi_E) \quad (۷-۳)$$

با بازنویسی رابطه (۲-۳) برای محاسبه توان تزریقی به PCC بر اساس روابط (۳-۳)، (۴-۳) و (۷-۳)، می‌توان نوشت:

$$S_i = \frac{1}{L_i} \left(|\psi_i| e^{j\varphi_i} - |\psi_E| e^{j\varphi_E} \right)^* \omega |\psi_E| e^{j\varphi_E} \quad (۸-۳)$$

بنابراین، نتیجه می‌شود:

$$S_i = \frac{\omega}{L_i} \left(|\psi_E| |\psi_i| e^{j\left(\frac{\pi}{2} - (\varphi_i - \varphi_E)\right)} - |\psi_E|^2 e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_E + \varphi_E\right)} \right) \quad (9-3)$$

با استفاده از نمایش رابطه (۹-۳) در دستگاه اعداد مختلط، نتیجه می‌شود:

$$S_i = \frac{\omega}{L_i} |\psi_i| |\psi_E| \sin(\varphi_i - \varphi_E) + j \frac{\omega}{L_i} \left(|\psi_i| |\psi_E| \cos(\varphi_i - \varphi_E) - |\psi_E|^2 \right) \quad (10-3)$$

توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی هر اینورتر به PCC با جداسازی رابطه (۱۰-۶) به بخش‌های حقیقی و موهومی، به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$P_i = \frac{\omega}{L_i} |\psi_i| |\psi_E| \sin(\delta_i) \quad (11-3)$$

$$Q_i = \frac{\omega}{L_i} \left(|\psi_i| |\psi_E| \cos(\delta) - |\psi_E|^2 \right) \quad (12-3)$$

که $\delta_i = \varphi_i - \varphi_E$ با فرض کوچک بودن δ_i نتیجه می‌شود که:

$$\sin \delta \approx \delta \quad (13-3)$$

$$\cos \delta \approx 1 \quad (14-3)$$

بنابراین، روابط (۱۱-۳) و (۱۲-۳) برای محاسبه توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$P_i = \frac{\omega}{L_i} |\psi_i| |\psi_E| \delta_i \quad (15-3)$$

$$Q_i = \frac{\omega |\psi_E|}{L_i} (|\psi_i| - |\psi_E|) \quad (16-3)$$

این روابط نشان می‌دهند که توان اکتیو با اختلاف زاویه فاز بین بردارهای شار مجازی اینورتر و PCC متناسب است. بعلاوه، توان راکتیو با اختلاف دامنه شار مجازی اینورتر و PCC مرتبط است. بنابراین روابط ریاضی توصیف کننده مشخصه افی شار مجازی برای اینورتر "I" در ریزشکه جزیره‌ای به صورت زیر استنتاج می‌شوند:

$$\bar{\delta}_i = \delta_i^n - m_i (P_i^n - P_i) \quad (۱۷-۳)$$

$$|\bar{\psi}_i| = |\psi_i^n| - n_i (Q_i^n - Q_i) \quad (۱۸-۳)$$

که δ_i^n مقدار نامی اختلاف زاویه‌ای بین بردارهای شار مجازی اینورتر و PCC، مقدار نامی دامنه شار مجازی اینورتر، m_i و n_i ضرایب مشخصه افی هستند. همچنین، P_i^n و Q_i^n به ترتیب مقادیر نامی توان اکتیو و توان راکتیو هستند. در نتیجه، بر اساس روابط (۱۷-۳) و (۱۸-۳) به ترتیب مقادیر تنظیم برای اختلاف زاویه‌ای و دامنه شار مجازی اینورتر یعنی $\bar{\delta}_i$ و $|\bar{\psi}_i|$ محاسبه می‌شوند.

۳-۳- تأثیرات نابرابری امپدانس خطوط در مشخصه افی شار مجازی

کارایی روش کنترل مبتنی بر مشخصه افی شار مجازی (VFD)، به امپدانس خطوط وابسته است. به بیان دیگر، هنگامی تقسیم توان متناسب با ظرفیت نامی منابع امکان پذیر خواهد شد که امپدانس خطوط برابر باشند. با این وجود، نابرابری امپدانس خطوط سبب بروز خطا در تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو می‌شود. بنابراین ضرورت دارد که اثر نامتعادلی امپدانس خطوط بر روی تقسیم توان مبتنی بر VFD، مورد مطالعه قرار گیرد.

با توجه به شکل (۲-۳)، افت ولتاژ بر روی خط "i" با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta V_i = V_i - E = Z_i \times I_i \quad (۱۹-۳)$$

و جریان تزریقی اینورتر "i" به PCC با مرتب کردن رابطه (۲-۳) به دست می‌آید:

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{E} \quad (۲۰-۳)$$

با در نظر گرفتن امپدانس خط به صورت $Z_i = R_i + j\omega L_i$ و جایگذاری جریان خط از رابطه (۲۰-۳) در رابطه (۱۹-۳) می‌توان نوشت:

$$\Delta V_i = \frac{L_i \omega Q_i + R_i P_i}{E} + j \frac{L_i \omega P_i - R_i Q_i}{E} \quad (۲۱-۳)$$

به دلیل کوچک بودن اختلاف زاویه بین بردارهای ولتاژ V_i و E و در نظر گرفتن روابط (۳-۱۳) و (۳-۱۴)، اندازه افت ولتاژ بر روی امپدانس خط با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$|\Delta V_i| \approx |V_i| - |E| \approx \frac{L_i \omega Q_i + R_i P_i}{E} \quad (۳-۲۲)$$

و همچنین، زاویه آن برابر است با:

$$\theta \approx \frac{L_i \omega P_i - R_i Q_i}{E^2} \quad (۳-۲۳)$$

بازنویسی روابط (۳-۲۲) و (۳-۲۳) بر حسب پارامترهای شار مجازی نتیجه می‌دهد:

$$\Delta \psi = |\psi_i| - |\psi_E| \approx \frac{|\Delta V_i|}{\omega} \approx \frac{|V_i| - |E|}{\omega} \approx \frac{L_i \omega Q_i + R_i P_i}{E \omega} \quad (۳-۲۴)$$

$$\delta_i = \varphi_i - \varphi_E \approx \frac{L_i \omega P_i - R_i Q_i}{E^2} \quad (۳-۲۵)$$

روابط (۳-۲۴) و (۳-۲۵) اثر امپدانس خط بر روی پارامترهای مشخصه افتی شار مجازی را نشان می‌دهند. بدون از دست دادن جامعیت مسئله، یک ریزش شبکه با دو منبع تولید انرژی با ظرفیت نامی یکسان مطابق شکل (۳-۲) در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، هر کدام از منابع باید توان‌های اکتیو و راکتیو یکسانی به PCC تزریق کنند. برای اینکه هر دو DG، توان یکسانی به ریزش شبکه تحویل دهند، مقادیر تنظیم برای هر دو واحد DG یعنی $\bar{\delta}_i$ و $|\bar{\psi}_i|$ در روابط (۳-۱۷) و (۳-۱۸) باید یکسان باشند. اکنون فرض می‌شود که پارامترهای امپدانس خط شماره دو، به عنوان مرجع در نظر گرفته شوند. در نتیجه، می‌توان نوشت:

$$R_2 = R_{ref} \quad (۳-۲۶-الف)$$

$$X_2 = X_{ref} \quad (۳-۲۶-ب)$$

نامتعادلی در پارامترهای امپدانس خطوط یعنی تفاضل راکتانس‌ها و مقاومت‌ها به صورت روابط زیر بیان می‌شود:

$$\Delta X = X_1 - X_2 \quad (۳-۲۷)$$

$$\Delta R = R_1 - R_2 \quad (۳-۲۸)$$

بر اساس روابط (۲۶-۳) تا (۲۸-۳)، پارامترهای امپدانس خط شماره یک به صورت روابط زیر بیان می‌شوند:

$$X_1 = X_{ref} + \Delta X \quad (۲۹-۳)$$

$$R_1 = R_{ref} + \Delta R \quad (۳۰-۳)$$

اکنون، اثر امپدانس خطوط بر روی تفاوت بین بردارهای شار مجازی اینورترها و بردار شار مجازی PCC را به صورت روابط زیر می‌توان بیان کرد:

$$\Delta \psi_2 = \Delta \psi_{ref} = \frac{X_{ref} Q_2 + R_{ref} P_2}{E \omega} \quad (۳۱-۳)$$

$$\begin{aligned} \Delta \psi_1 &= \frac{X_{ref} Q_1 + R_{ref} P_1}{E \omega} + \frac{\Delta X Q_1 + \Delta R P_1}{E \omega} \\ &= \Delta \psi_{ref} + d\psi \end{aligned} \quad (۳۲-۳)$$

همانطور که از روابط (۳۱-۳) و (۳۲-۳) دیده می‌شود، به دلیل اینکه $\Delta \psi_2 = \Delta \psi_{ref}$ ، $d\psi$ عامل ایجاد خطا در تقسیم توان راکتیو بین واحدهای DG است. به طور مشابه، اثرات امپدانس خطوط بر اختلاف زاویه بین بردارهای شار مجازی اینورتر و بردار شار مجازی PCC، به صورت روابط (۳۳-۳) و (۳۴-۳) محاسبه می‌شود:

$$\delta_2 = \frac{X_{ref} P_2 - R_{ref} Q_2}{E} \quad (۳۳-۳)$$

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{(X_{ref} + \Delta X) P_1 - (R_{ref} + \Delta R) Q_1}{E} \\ &= \delta_{ref} + d\delta \end{aligned} \quad (۳۴-۳)$$

به طور مشابه، $d\delta$ عامل خطا در تقسیم توان اکتیو بین واحدهای DG است.

لازم به ذکر است که روابط فوق را برای n واحد DG نیز می‌توان تعمیم داد که در این حالت، یک

DG به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود و مشابه روابط فوق $d\psi$ و $d\delta$ را برای n-1 واحد DG باقیمانده می‌توان بیان کرد.

۳-۴- طرح پیشنهادی مبتنی بر شار مجازی اصلاحی

اگرچه برابر بودن مقاومت‌ها و اندوکتانس‌های خطوط یعنی $R_1 = R_2$ و $X_1 = X_2$ در روابط (۳-۳۲) و (۳-۳۴) منجر به $d\Psi = 0$ و $d\delta = 0$ خواهد شد و تقسیم توان صحیح بین واحدهای DG متناسب با ظرفیت آنها را نتیجه می‌دهد؛ اما در شرایط نابرابری امپدانس خطوط، خواهیم داشت: $(R_1 \neq R_2)$ و $(X_1 \neq X_2)$ که این مسئله سبب می‌شود تا عوامل تقسیم نامتناسب توان بین واحدهای DG ($d\Psi$) و $d\delta$ صفر نباشند. برای حل این مشکل، ایده امپدانس مجازی، راهکار مفیدی به شمار می‌رود. با در نظر گرفتن پارامترهای امپدانس مجازی به صورت زیر، مشکل نامتعادل بودن امپدانس خطوط را می‌توان برطرف کرد:

$$X_V = -\Delta X \quad (۳-۳۵)$$

$$R_V = -\Delta R \quad (۳-۳۶)$$

که X_V و R_V به ترتیب راکتانس و مقاومت امپدانس مجازی هستند. در اثر استفاده از امپدانس مجازی، عبارت‌های $d\Psi$ و $d\delta$ برابر با صفر خواهند شد و بنابراین تقسیم توان، به طور صحیح و متناسب با ظرفیت منابع انجام خواهد شد. با این وجود، این راهکار نیاز به داشتن اطلاع از امپدانس خطوط (که به راحتی قابل دستیابی نیست) دارد. در این پژوهش پیشنهاد می‌شود که این مشکل با راهکار دیگری حل شود؛ به این صورت که، به جای اینکه از ایده امپدانس‌های مجازی به طور مستقیم برای تعیین روابط اصلی استفاده شود، به طور غیرمستقیم و با جبران‌سازی اثرات نامطلوب نابرابری امپدانس خطوط بر روی پارامترهای مشخصه افتی شار مجازی به کار گرفته شود. در این راستا، مقادیر تنظیم برای هر دو منبع با ظرفیت نامی مشابه بر اساس روش VFD در شکل (۳-۳)، به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\bar{\delta}_1 = \delta_{ref} + d\delta \quad (۳-۳۷)$$

$$\bar{\delta}_2 = \delta_{ref} \quad (۳-۳۸)$$

$$|\bar{\psi}_1| = |\psi_E| + \Delta\psi_{ref} + d\Psi \quad (۳-۳۹)$$

$$|\bar{\psi}_2| = |\psi_E| + \Delta\psi_{ref} \quad (40-3)$$

برای غلبه بر اثرات نامطلوب نابرابری امپدانس خطوط بر روی پارامترهای مشخصه افتی شار مجازی، مقادیر تنظیم باید اصلاح شوند. به عبارت دیگر، مقادیر این کمیت‌ها باید به صورت زیر باشند:

$$\bar{\delta}_1 + \bar{d\delta} = \delta_{ref} + d\delta \quad (41-3)$$

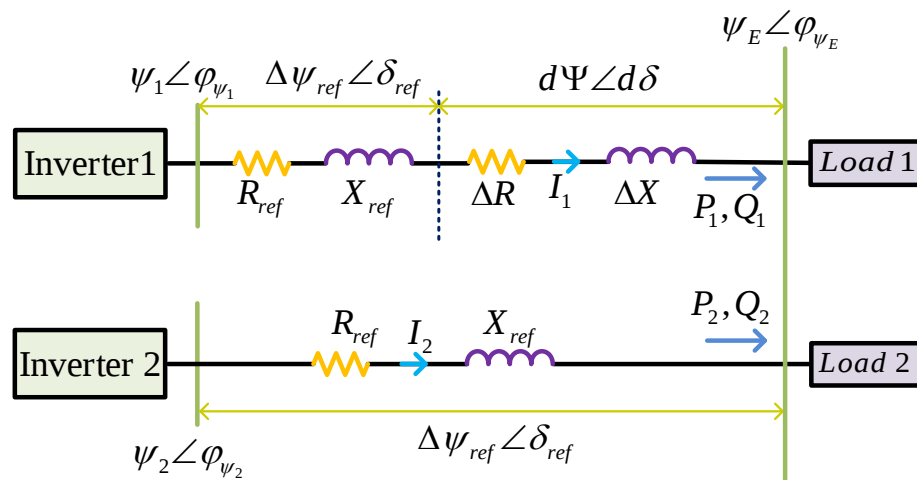
$$|\bar{\psi}_1| + \bar{d\psi} = |\psi_E| + \Delta\psi_{ref} + d\Psi \quad (42-3)$$

برای برقراری روابط فوق و با در نظر گرفتن شکل (3-3)، طرح کنترلی به صورت زیر طراحی می‌شود:

$$\bar{d\delta} = d\delta \quad (43-3)$$

$$\bar{d\psi} = d\Psi \quad (44-3)$$

در نتیجه، ضرورت دارد که عبارات جبران سازی افزوده شوند تا اثرات $d\Psi$ و $d\delta$ را حذف کنند. با در نظر گرفتن این نکته که دسترسی به اندازه مقادیر پارامترهای امپدانس خطوط، به سادگی میسر نیست، هدف این فصل، استفاده از تطبیق امپدانس برای تقسیم توان نیست. به همین دلیل، ایده امپدانس مجازی به صورتی استفاده می‌شود تا تاثیرات ناشی از نابرابری امپدانس‌های خطوط بر روی مقادیر تنظیم حاصل از مشخصه افتی شار مجازی جبران شود. در این راستا، ایده امپدانس مجازی به صورت روابط (45-3) و (46-3) مورد استفاده قرار می‌گیرد:



شکل (3-3): مدل ساده شده ریز شبکه از دید اینورتر شماره دو (به عنوان مرجع).

$$-d\delta_v = \overline{d\delta} \quad (45-3)$$

$$-d\psi_v = \overline{d\psi} \quad (46-3)$$

که $d\delta_v$ و $d\psi_v$ اختلاف زاویه‌ای و اختلاف بین اندازه‌های شارهای مجازی اینورتر و PCC هستند و توسط امپدانس مجازی فرضی تولید می‌شوند. در نتیجه:

$$-\frac{X_v P_1 - R_v Q_1}{E\omega} = \frac{\Delta X P_1 - \Delta R Q_1}{E\omega} \quad (47-3)$$

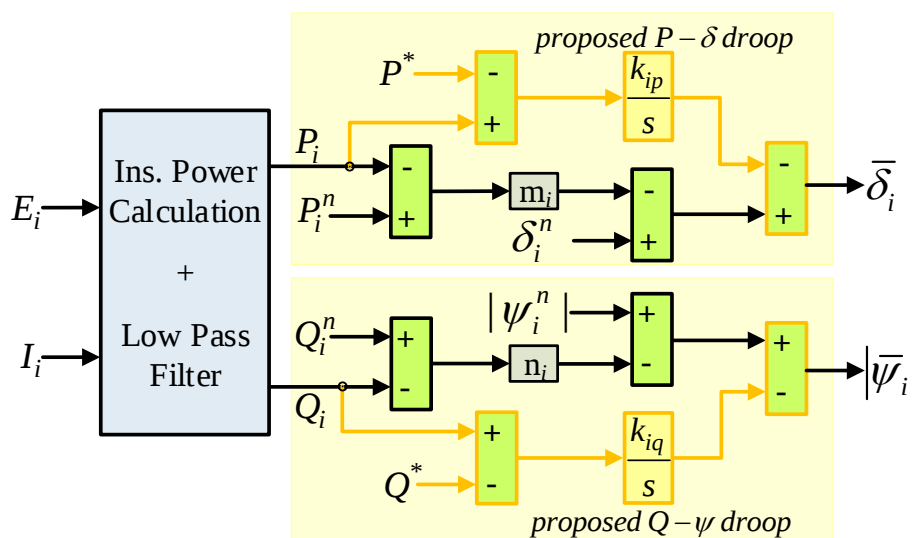
$$-\frac{X_v P_1 + R_v Q_1}{E\omega} = \frac{\Delta X P_1 + \Delta R Q_1}{E\omega} \quad (48-3)$$

در نتیجه در این رساله پیشنهاد می‌شود که از مزایای روش کنترل VFD و ایده امپدانس مجازی، به طور همزمان استفاده شود. در نتیجه، استراتژی مشخصه افتی شار مجازی اصلاحی به صورت شکل (4-3)، ارائه می‌شود که روابط آن به صورت زیر هستند:

$$\bar{\delta}_i = \delta_i^n - m_i (P_i^n - P_i) - k_{ip} \int (P_i - P^*) dt \quad (49-3)$$

$$|\bar{\psi}_i| = |\psi_i^n| - n_i (Q_i^n - Q_i) - k_{iq} \int (Q_i - Q^*) dt \quad (50-3)$$

که k_{ip} و k_{iq} به ترتیب، ضرایب جبران‌کننده برای توان اکتیو و توان راکتیو هستند. عبارات انتهایی در روابط (49-3) و (50-3) اثراتی در مقادیر تنظیم تولید می‌کند که مشابه با اثرات ناشی از پارامترهای امپدانس مجازی روی مقادیر تنظیم به منظور جبران اثرات نامطلوب نابرابری امپدانس خطوط هستند.



شکل (4-3): مشخصه افتی اصلاحی پیشنهادی مبتنی بر شار مجازی.

به عبارت دیگر با در نظر گرفتن روابط (۳-۴۵) تا (۳-۴۸) ایده امیدانس مجازی به طور غیرمستقیم برای حذف اثرات نامطلوب نابرابری امیدانس خطوط استفاده می‌شود؛ در حالی که نیازی به دانستن پارامترهای امیدانس خطوط نیست؛ به این صورت که عبارات انتگرالی ساده‌ای اضافه می‌شوند که تاثیر امیدانس مجازی فرضی را بر روی مقادیر تنظیم $\bar{\delta}_i$ و $|\bar{V}_i|$ تولید می‌کنند و در نتیجه تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو به درستی انجام می‌شود. در این شرایط، به تطبیق پارامترهای امیدانس خطوط نیازی نیست و اثرات نابرابری امیدانس‌های خطوط به طور غیرمستقیم جبران می‌شوند. به بیان دیگر، با در نظر گرفتن روابط (۳-۴۷) و (۳-۴۸)، عبارات جبران‌ساز در روابط (۳-۴۹) و (۳-۵۰) اثراتی مشابه پارامترهای امیدانس مجازی فرضی تولید می‌کنند. در نتیجه، تقسیم توان صحیح متناسب با ظرفیت واحدهای DG، به دست می‌آید.

لازم به ذکر است که توان تحویلی هر منبع به PCC، از طریق خطوط ارتباطی به سیستم مدیریت انرژی^۲ (EMS) ارسال می‌شود و مقادیر مرجع مناسب P^* و Q^* متناسب با ظرفیت هر منبع، به واحدهای کنترلی ارسال خواهد شد؛ به صورتی که منابع با ظرفیت نامی یکسان، مقادیر مرجع مشابهی دریافت خواهند کرد. با توجه به اینکه، خطوط ارتباطی در کنترل حلقه بسته به کار نمی‌روند و تنظیم پارامترهای سیستم کنترل مستقل از خطوط ارتباطی انجام می‌شود، دقت طرح کنترل تقسیم توان تحت تاثیر تاخیر زمانی در خطوط ارتباطی قرار نمی‌گیرد.

۳-۵- تحلیل سیگنال کوچک

در این بخش، با ارائه مدل سیگنال کوچک^۳ از تکنیک شار مجازی اصلاحی، پارامترهای جبرانسازی به صورتی تنظیم می‌شوند تا پایداری طرح کنترل و همچنین رفتار مطلوب سیستم در حالت گذرا به طور همزمان حفظ شوند. همچنین تاثیر تاخیر زمانی در خطوط مخابراتی بر روی حالت گذرای سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

^۲ Energy Management System

^۳ Small Signal

۳-۵-۱- تنظیم ضرایب جبران کننده (k_{ip}, k_{iq})

همانطور که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است، واحدهای DG با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به PCC متصل می‌شوند. این امر منجر به اینرسی کمتر در مقایسه با ماشین‌های سنکرون با ظرفیت مشابه می‌شود و در نتیجه، پاسخ‌های دینامیکی در مقایسه با ماشین‌های دوار متداول، سریع‌تر خواهند بود. از طرف دیگر، اغتشاشات می‌توانند تاثیر بیشتری در ناپایداری سیستم داشته باشند. در این راستا، از تحلیل سیگنال کوچک برای ارزیابی پایداری استراتژی کنترل ریزشبه، تنظیم ضرایب جبران‌کننده و همچنین سایر پارامترهای کنترل بهره برده می‌شود.

مدل‌های خطی روابط (۱۵-۳) و (۱۶-۳) برای توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی هر منبع به PCC با روابط زیر ارائه می‌شوند:

$$\Delta P(s) = G_p \cdot \Delta \bar{\delta}(s) \quad (۵۱-۳)$$

$$\Delta Q(s) = G_q \cdot \Delta |\bar{\psi}|(s) \quad (۵۲-۳)$$

که Δ مقادیر انحراف را نشان می‌دهد. G_p و G_q مقادیر محاسبه شده حول نقطه کار هستند و از روابط (۵۳-۳) و (۵۴-۳) محاسبه می‌شوند:

$$G_p = \frac{\omega}{L} |\psi_E| |\psi_V| \cos \delta \Big|_{\delta=\delta_{io} \& |\psi_E|=|\psi_{Eo}| \& |\psi_V|=|\psi_{Vo}|} \quad (۵۳-۳)$$

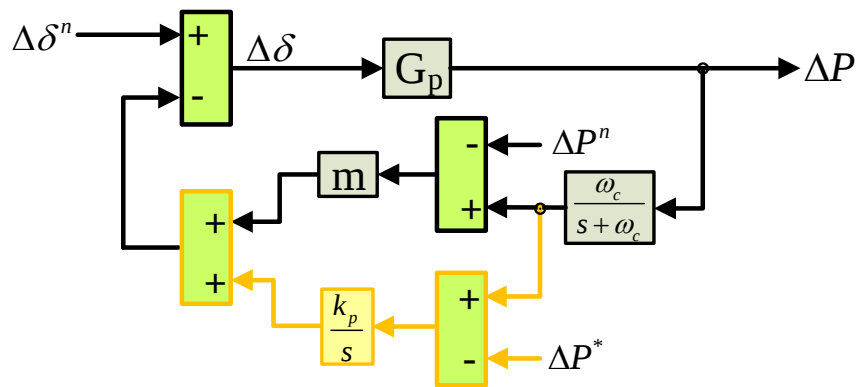
$$G_q = \frac{\omega}{L} |\psi_E| \cos \delta \Big|_{\delta=\delta_{io} \& |\psi_E|=|\psi_{Eo}|} \quad (۵۴-۳)$$

δ_{io} ، $|\psi_{Eo}|$ و $|\psi_{Vo}|$ به ترتیب مقادیر اختلاف زاویه‌ای، دامنه شار مجازی PCC و دامنه شار مجازی اینورتر در نقطه کار هستند. با خطی‌سازی روابط (۴۹-۳) و (۵۰-۳) و سپس بیان معادلات حاصل در حوزه لاپلاس می‌توان نوشت:

$$\Delta \bar{\delta}(s) = \Delta \delta^n(s) - m \left(\Delta P^n(s) - \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta P(s) \right) - \frac{k_p}{s} \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta P(s) - \Delta P^*(s) \right) \quad (55-3)$$

$$\Delta |\bar{\psi}|(s) = \Delta |\psi^n|(s) - n \left(\Delta Q^n(s) - \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta Q(s) \right) - \frac{k_q}{s} \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta Q(s) - \Delta Q^*(s) \right) \quad (56-3)$$

که فیلتر پایین گذر به صورت تقریب مرتبه یک، مدل سازی می شود و ω_c فرکانس زاویه ای قطع است. مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته مبتنی بر مشخصه افقی $P-\delta$ در شکل (5-3) نشان



شکل (5-3): مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته مبتنی بر مشخصه افقی $P-\delta$.

داده شده است. با در نظر گرفتن ΔP به عنوان خروجی و $\Delta \delta^n$ و ΔP^n و ΔP^* به عنوان ورودی حلقه کنترل مشخصه افقی $P-\delta$ ، تابع تبدیل این حلقه به صورت رابطه (57-3) حاصل می شود:

$$\Delta P(s) = \frac{G_p s(s + \omega_c)}{denP} \left(\Delta \delta^n(s) + m \Delta P^n(s) + m \Delta P^*(s) \right) \quad (57-3)$$

معادله مشخصه رابطه فوق به صورت زیر به دست می آید:

$$denP: s^2 + \omega_c(1 - G_p m)s + k_p \omega_c G_p = 0 \quad (58-3)$$

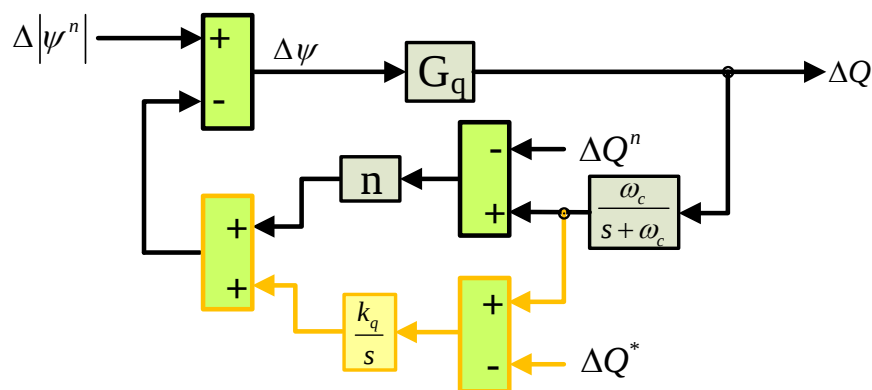
به طور مشابه، مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته مبتنی بر مشخصه افقی $Q-|\psi|$ در شکل (6-3) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن ΔQ به عنوان خروجی و $\Delta |\psi^n|$ و ΔQ^n و ΔQ^* به

عنوان متغیرهای ورودی برای حلقه کنترل مشخصه افقی $Q-|\psi|$ ، تابع تبدیل به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta Q(s) = \frac{G_q(s + \omega_c)}{denQ} \left(s \left(\Delta |\psi|^n(s) - n \Delta Q^n(s) \right) + k_q \Delta Q^*(s) \right) \quad (59-3)$$

در نتیجه، معادله مشخصه رابطه (59-3) به صورت رابطه (60-3) خواهد بود:

$$denQ: s^2 + \omega_c(1 - G_q n)s + k_q \omega_c G_q = 0 \quad (60-3)$$



شکل (6-3): مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته مبتنی بر مشخصه افقی $Q-|\psi|$.

مقادیر ویژه معادلات مشخصه (58-3) و (60-3) وابسته به پارامترهای کنترلی در استراتژی پیشنهادی هستند و این متغیرها باید به صورتی تنظیم شوند تا پایداری سیستم حفظ شود. همچنین رفتار سیستم در حالت گذرا عملکرد مناسبی داشته باشد. مقادیر ویژه در حلقه‌های کنترلی $P-\delta$ و $Q-|\psi|$ به ازای $k_p > 0$ و $k_q > 0$ در سمت چپ محور موهومی قرار دارند. بعلاوه، به دلیل تضاد بین حداکثر فراجش و زمان صعود در مدل‌های مرتبه دوم، بهتر است که نسبت میرایی بین 0.4 و 0.8 باشد [49-48]. با در نظر گرفتن این شرط برای روابط (58-3) و (60-3)، خواهیم داشت:

$$0.4 \leq \frac{\omega_c(1 - G_p m)}{2 \times \sqrt{k_p \omega_c G_p}} \leq 0.8 \quad (61-3)$$

$$0.4 \leq \frac{\omega_c(1 - G_q n)}{2 \times \sqrt{k_q \omega_c G_q}} \leq 0.8 \quad (62-3)$$

در نتیجه، پاسخ گذرا به اندازه کافی سریع و به اندازه کافی میرا خواهد بود [۴۹]. با مرتب سازی روابط فوق، برای انتخاب ضرایب جبران سازی k_p و k_q ، به دست می آید:

$$\frac{\omega_c (1-G_p m)^2}{1.6^2 G_p} \leq k_p \leq \frac{\omega_c (1-G_p m)^2}{0.8^2 G_p} \quad (۶۳-۳)$$

$$\frac{\omega_c (1-G_q n)^2}{1.6^2 G_q} \leq k_q \leq \frac{\omega_c (1-G_q n)^2}{0.8^2 G_q} \quad (۶۴-۳)$$

با توجه به اینکه $G_p > 0$ ، $n < 0$ ، $m < 0$ و $G_q > 0$ ، نتیجه می شود:

$$0 < \frac{\omega_c (1-G_p m)^2}{1.6^2 G_p} \quad (۶۵-۳)$$

$$0 < \frac{\omega_c (1-G_q n)^2}{1.6^2 G_q} \quad (۶۶-۳)$$

بنابراین با انتخاب ضرایب جبران سازی k_p و k_q بر اساس روابط (۶۳-۳) و (۶۴-۳)، هر دو شاخص پایداری و رفتار مطلوب در حالت گذرا برآورده می شوند.

۳-۵-۲- مطالعه تاثیر تاخیر زمانی در خطوط ارتباطی

تغییرات شبکه های متداول امروزی در راستای تحقق شبکه های هوشمند است و در این شرایط، دسترسی به خطوط ارتباطی با کیفیت تسهیل می شود که پیامد آن کاهش تاخیرهای زمانی در خطوط ارتباطی است.

در طرح پیشنهادی شار مجازی اصلاحی، مقادیر مرجع P^* و Q^* از طرف سیستم مدیریت انرژی با استفاده از خطوط ارتباطی به سمت واحدهای کنترل اینورترها ارسال می شوند. از طرف دیگر، پارامترهای سیستم کنترل با تحلیل سیگنال کوچک محاسبه می شوند. به بیان دیگر، مقادیر این متغیرها برای هر اینورتر با استفاده از داده های محلی و مستقل از نیاز به تبادل داده با EMS تنظیم می شوند. بعلاوه، در شرایط عادی، مقادیر مرجع P^* و Q^* فقط وابسته به مقادیر توان مورد نیاز بارهای ریزشبکه هستند و در اثر عملیات تنظیم پارامترهای سیستم کنترل تغییر نمی کنند. بنابراین، تا زمانی که بارهای

ریزشبکه بدون تغییر باقی بمانند، این مقادیر مرجع نیز ثابت باقی می‌مانند و در این شرایط دقت تقسیم توان تحت تاثیر تاخیر زمانی در خطوط ارتباطی قرار نخواهد گرفت.

برای تحلیل اثر تاخیر زمانی در خطوط ارتباطی بر رفتار دینامیکی طرح کنترل پیشنهادی، شکل‌های (۵-۳) و (۶-۳) به صورت شکل‌های (۷-۳) و (۸-۳) در نظر گرفته می‌شوند که به ترتیب مدل‌های سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته مبتنی بر مشخصه افقی $P-\delta$ و $Q-|\psi|$ را با در نظر گرفتن تاخیر زمانی τ_D در خطوط ارتباطی نشان می‌دهند در نتیجه، روابط (۵۵-۳) و (۵۶-۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\Delta \bar{\delta}(s) = \Delta \delta^n(s) - m \left(\Delta P^n(s) - \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta P(s) \right) - \frac{k_p}{s} \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta P(s) - \frac{1}{\tau_D s + 1} \Delta P^*(s) \right) \quad (۶۷-۳)$$

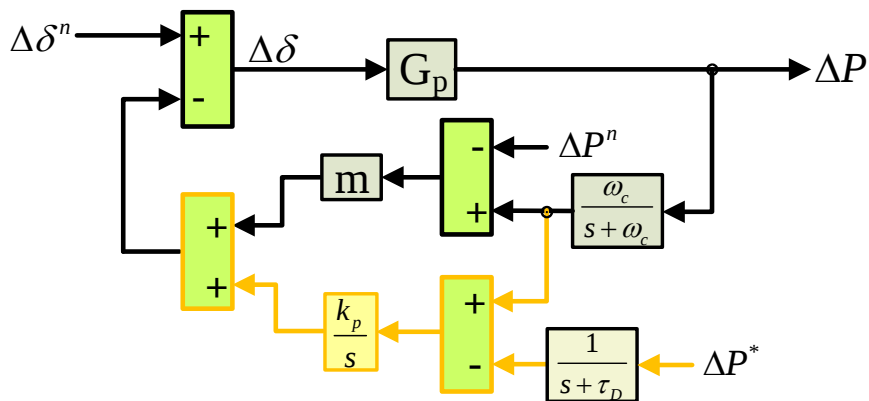
$$\Delta |\bar{\psi}|(s) = \Delta |\psi^n|(s) - n \left(\Delta Q^n(s) - \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta Q(s) \right) - \frac{k_q}{s} \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta Q(s) - \frac{1}{\tau_D s + 1} \Delta Q^*(s) \right) \quad (۶۸-۳)$$

مشابه با روند طی شده برای دستیابی به روابط (۵۸-۳) و (۶۰-۳)، معادلات مشخصه حلقه کنترل $P-\delta$ و $Q-|\psi|$ به ترتیب به صورت روابط زیر حاصل می‌شوند:

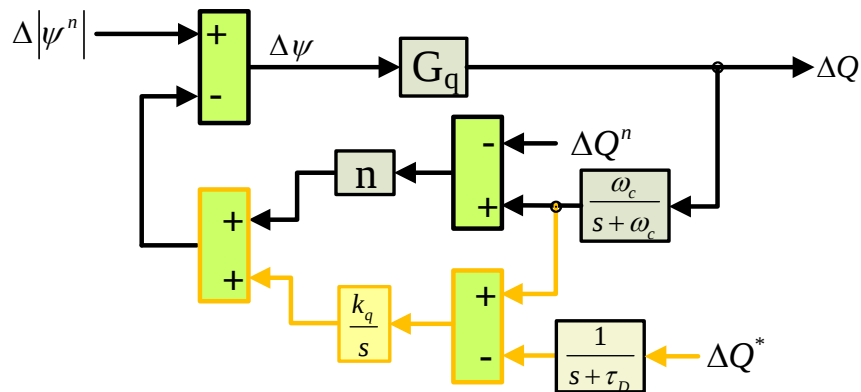
$$\underbrace{(s^2 + \omega_c(1 - G_p m)s + k_p \omega_c G_p)}_{A1} \underbrace{(\tau_D s + 1)}_B \quad (۶۹-۳)$$

$$\underbrace{(s^2 + \omega_c(1 - G_q n)s + k_q \omega_c G_q)}_{A2} \underbrace{(\tau_D s + 1)}_B \quad (۷۰-۳)$$

بنابراین پاسخ هر کدام از حلقه‌های کنترل $P-\delta$ و $Q-|\psi|$ ، مجموع پاسخ یک سیستم مرتبه اول (B) و یک سیستم مرتبه دوم ($A1$ و $A2$) است. بعلاوه، $A1$ و $A2$ معادلات مشخصه‌ای هستند که به ترتیب در روابط (۵۸-۳) و (۶۰-۳) به دست آمده‌اند. شرط لازم برای برقراری رابطه (۶۱-۳) این است که ریشه‌های $A1$ مزدوج مختلط باشند. به طور مشابه، این نکته برای برای ریشه‌های $A2$ و تحقق



شکل (۷-۳): مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته
مبتنی بر مشخصه افقی $P-\delta$ با در نظر گرفتن تاخیر زمانی τ_D .



شکل (۸-۳): مدل سیگنال کوچک برای کنترل حلقه بسته
مبتنی بر مشخصه افقی $Q-|\psi|$ با در نظر گرفتن تاخیر زمانی τ_D .

رابطه (۶۲-۳) نیز صدق می‌کند. برای کاهش اثرات تاخیر زمانی در خطوط ارتباطی بر پاسخ حالت گذرای سیستم، پارامترهای کنترل باید به صورتی انتخاب شوند که قدر مطلق قسمت‌های حقیقی ریشه‌های معادلات مرتبه دوم (σ_{A1} و σ_{A2}) به صورتی تنظیم شوند که معیارهای زیر را برآورده کنند:

$$\sigma_{A1} \leq 0.2 \tau_D^{-1} \quad (۷۱-۳)$$

$$\sigma_{A2} \leq 0.2 \tau_D^{-1} \quad (۷۲-۳)$$

روابط فوق به این نکته اشاره دارند که نسبت بین قدر مطلق بخش حقیقی از قطب ناشی از تاخیر زمانی (یعنی $1/\tau_D$) و قدر مطلق‌های بخش‌های حقیقی از قطب‌های مربوط به معادلات مرتبه دوم (σ_{A1} و σ_{A2}) بیشتر از ۵ باشد. در نتیجه، ریشه‌های معادلات $A1$ و $A2$ به ترتیب، قطب‌های غالب در حلقه‌های کنترل $P-\delta$ و $Q-|\psi|$ می‌شوند. در این شرایط، به دلیل کندتر بودن پاسخ گذرای ناشی از معادلات

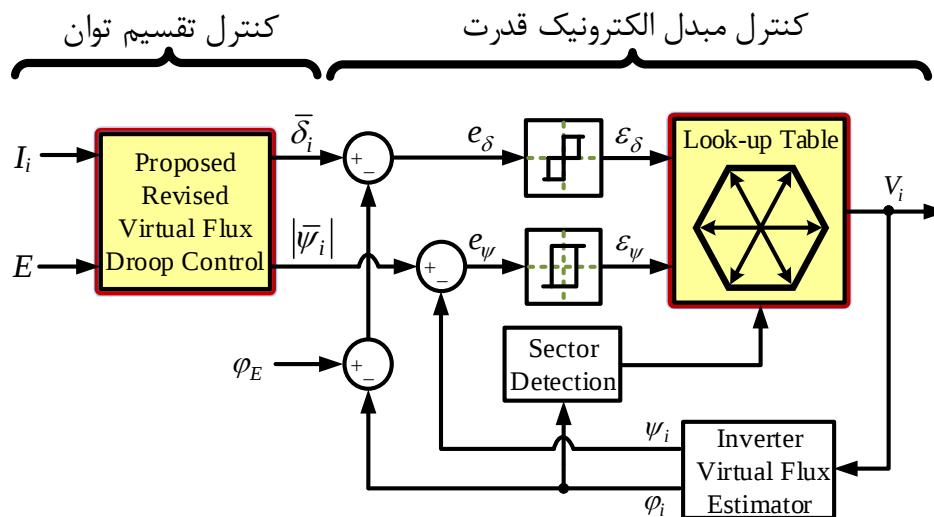
$A1$ و $A2$ ، می‌توان بیان کرد که پاسخ حالت گذرای سیستم فقط وابسته به پارامترهای سیستم کنترل و مستقل از تاخیر زمانی است. در این پژوهش، حداکثر تاخیر زمانی برابر با 20 ms در نظر گرفته شده است. در نتیجه قطب ناشی از معادله مرتبه اول (B) در روابط $(3-69)$ و $(3-70)$ در $s = -1/\tau_D = -50$ قرار می‌گیرد. با توجه به روابط $(3-71)$ و $(3-72)$ ، نقاط کار برای حلقه‌های کنترل $P-\delta$ و $Q-|V|$ باید بین $\sigma = -1/5\tau_D = -10$ و محور موهومی باشد تا اثر تاخیر زمانی در خطوط مخابراتی به ازای مقادیر کمتر از 20 ms در پاسخ گذرای سیستم قابل صرف‌نظر کردن باشد. لازم به ذکر است که می‌توان تنظیم پارامترهای سیستم را به صورتی انجام داد که پاسخ گذرای سیستم به ازای مقادیر بزرگتر تاخیر زمانی نیز تحت تاثیر قرار نگیرد؛ اگرچه، این عمل سبب کندتر شدن پاسخ حالت گذرای سیستم می‌شود.

۳-۶- استراتژی کنترل توان برای ریزشکه جزیره‌ای

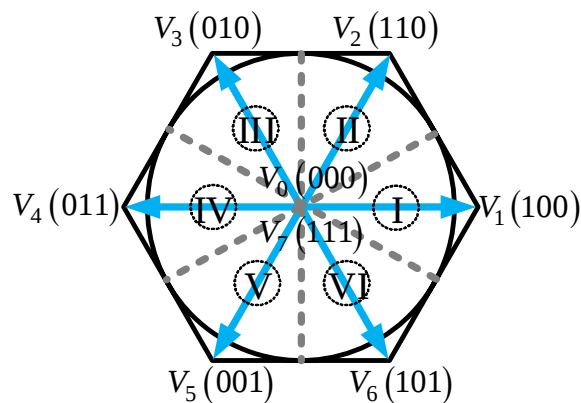
طرح کنترل پیشنهادی برای ریزشکه جزیره‌ای در شکل $(3-9)$ آمده است، جایی که از استراتژی $RVFD^4$ پیشنهادی برای محاسبه مقادیر فرمان یعنی اختلاف زاویه بین بردارهای شار مجازی اینورتر و PCC و اندازه بردار شار مجازی اینورتر استفاده می‌شود. متعاقباً از روش کنترل مستقیم شار برای تولید بردار کلیدزنی مناسب بهره برده می‌شود. در نتیجه، هر دو مقدار کنترلی با مقادیر لحظه‌ای خودشان که با استفاده از وضعیت کنونی کلیدهای اینورتر به دست می‌آیند، مقایسه خواهند شد. از یک کنترل‌کننده هیستریزس دو سطحی برای خطای دامنه بردار شار مجازی و یک کنترل‌کننده هیستریزس سه سطحی برای خطای اختلاف زاویه‌ای استفاده می‌شود. همچنین، مطابق شکل $(3-10)$ ، صفحه $\alpha-\beta$ به شش بخش تقسیم می‌شود و ناحیه‌ای که بردار لحظه‌ای شار مجازی اینورتر در آن قرار دارد، تعیین می‌شود. با توجه به اینکه از یک اینورتر دو سطحی استفاده شده است، ۸ بردار کلیدزنی مختلف وجود دارد که شامل ۶ بردار کلیدزنی فعال و دو بردار کلیدزنی غیرفعال می‌شوند و در شکل $(3-10)$ آمده‌اند. با توجه به اساس ایده کنترل مستقیم شار که انتخاب بردار کلیدزنی از یک جدول مراجعه‌ای

⁴ Revised Virtual Flux Droop

است، بردار کلیدزنی مناسب انتخاب و به کلیدهای اینورتر اعمال می‌شود. در این پژوهش از جدول کلیدزنی (۱-۳) بهره برده می‌شود. در این جدول، ε_δ و ε_ψ خروجی کنترل‌کننده‌های هیستریزس مربوط به خطای اختلاف زاویه‌ای و خطای دامنه شار مجازی اینورتر هستند. بعلاوه، m شماره ناحیه‌ای است که بردار لحظه‌ای شار مجازی در آن قرار دارد.



شکل (۳-۹): بلوک دیاگرام طرح کنترل ریزشبه پیشنهادی.



شکل (۳-۱۰): بردارهای فضایی ولتاژ و بردارهای کلیدزنی مربوطه در صفحه $\alpha - \beta$.

لازم به ذکر است که فرکانس و دامنه ولتاژ PCC به طور غیرمستقیم کنترل می‌شوند. به بیان دیگر، ابتدا یک مجموعه ولتاژ سه فاز با فرکانس ثابت به عنوان مرجع مجازی تعریف می‌شوند و از این مرجع مجازی برای محاسبه بردار شار مجازی PCC استفاده می‌شود. سپس، عدد به دست آمده برای زاویه بردار شار مجازی PCC از مقدار لحظه‌ای برای زاویه بردار شار مجازی اینورتر کسر می‌شود و در نتیجه مقدار لحظه‌ای اختلاف زاویه‌ای بین بردارهای شار مجازی اینورتر و PCC محاسبه می‌شود. به دلیل

دقت بالای کنترل این اختلاف زاویه‌ای، هر دو بردارهای شار مجازی اینورتر و PCC با فرکانس یکسان در صفحه $\alpha - \beta$ خواهند چرخید. بنابراین حتی اگر زاویه اولیه بردارهای شار مجازی هر اینورتر نامشخص باشند، بدون وابستگی به تغییرات اختلاف زاویه‌ای، فرکانس تغییر نخواهد کرد. همچنین، با تنظیم مقدار نامی بردار شار مجازی اینورتر، دامنه ولتاژ PCC کنترل می‌شود.

جدول (۱-۳): جدول کلیدزنی برای استراتژی DFC.

ε_{δ}	ε_{ψ}	Selected voltage
1	1	V_{m+1}
1	0	V_{m+2}
0	1	V_0
0	0	V_0
-1	1	V_{m+5}
-1	0	V_{m+4}

۳-۷- شبیه‌سازی روش پیشنهادی و تحلیل نتایج

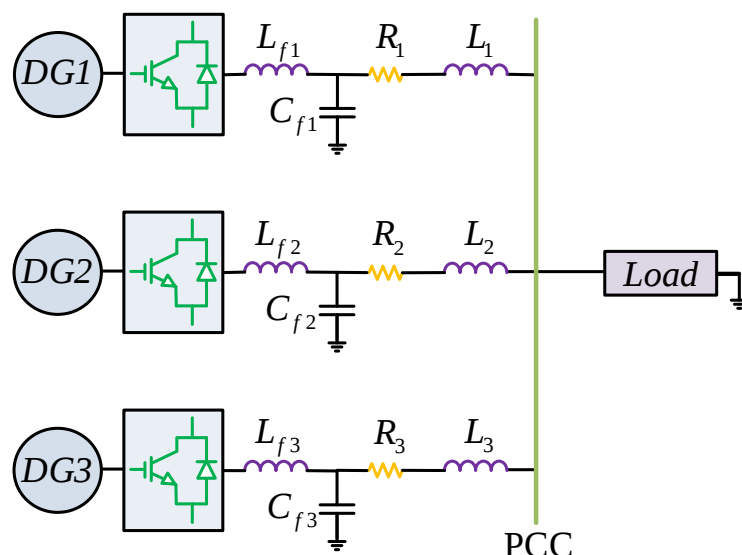
به منظور ارزیابی عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهادی، از شبیه‌سازی ریزشبه و سیستم کنترل در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink استفاده می‌شود. واحدهای DG به صورت منابع ایده‌آل مدل‌سازی می‌شوند. همچنین، نتایج مربوط به استراتژی کنترل RVFD پیشنهادی با روش‌های متداول مقایسه می‌شوند. در این راستا، طرح پیشنهادی، در سه سناریوی مختلف، شامل برابر بودن یا نبودن ظرفیت واحدهای DG و استفاده یا عدم استفاده از خطوط ارتباطی^۵ و حضور بار مشترک یا بارهای محلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در مبدل‌های موازی، جریان چرخشی جزء لاینفک این ساختارها است و روش‌های کاهش جریان چرخشی و اثرات آن، خود یک تحقیق جداگانه به حساب می‌آید و در رویه مقالات مرتبط با تقسیم توان در ریزشبه‌ها، با توجه به اینکه، هدف، تقسیم صحیح توان بین واحدهای DG است، جریان چرخشی در نظر گرفته نمی‌شود. بعلاوه، به دلیل اینکه جریان چرخشی در مقایسه با جریان عبوری از هر مبدل، بسیار کوچک است و از طرفی تمرکز این رساله بر ارائه یک روش نوین برای تقسیم توان می‌باشد، با تقریب مناسبی از آن در اینجا می‌توان صرف‌نظر کرد.

⁵ Tie-Lines

۳-۷-۱- نتایج

سناریو اول: ظرفیت واحدهای DG نابرابر و عدم استفاده از خطوط ارتباطی در ریزشبهه و استفاده از بار مشترک

یک ریزشبهه جزیره‌ای مشابه شکل (۳-۱۱) شامل سه واحد DG موازی که بار مشترکی را تغذیه می‌کنند، در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی می‌شود. مشخصات این ریزشبهه در جدول (۳-۲) آمده است. اندازه خازن و سلف مربوط به فیلترهای هر سه واحد DG یکسان هستند. ظرفیت نامی DG2 برابر با $1/2$ و ظرفیت نامی DG3 برابر با $0/7$ نسبت به DG1 در نظر گرفته شده است. یک کاهش و افزایش ناگهانی در بارهای ریزشبهه به ترتیب در لحظات $t=4s$ و $t=7s$ رخ می‌دهند. شکل‌های (۳-۱۲) تا (۳-۱۴) توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی DG ها را بر اساس روش متداول VFD، روش متداول CD-VI^۶ و همچنین روش پیشنهادی نشان می‌دهند. همچنین در شکل‌های (۳-۱۵) و (۳-۱۶)، به ترتیب روش‌های CD-VI و روش پیشنهادی در لحظه $t=1s$ فعال می‌شوند. همانطور که ملاحظه می‌شود، در روش متداول VFD، تقسیم توان متناسب با ظرفیت DG ها انجام نمی‌شود و واحد DG که دارای امپدانس خط کوچکتری است، توان بیشتری به ریزشبهه تزریق می‌کند که این مسئله



شکل (۳-۱۱): دیاگرام شماتیک ریزشبهه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو اول.

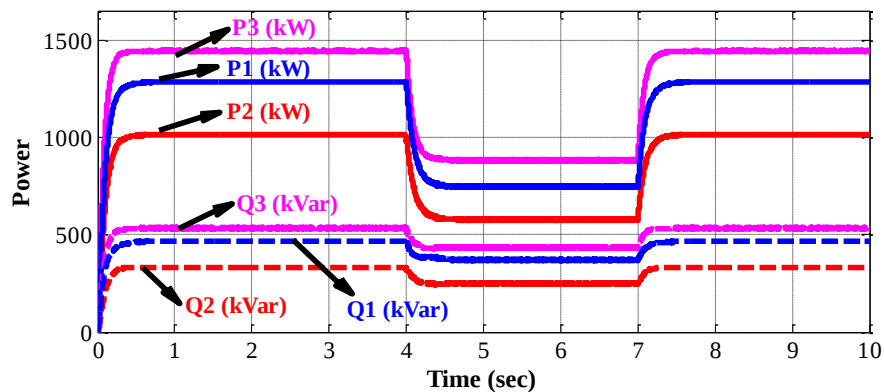
^۶ Conventional Droop technique based on $P - \omega$ and $Q - V$ with Virtual Impedance

جدول (۳-۲): پارامترهای شبیه‌سازی برای ریزشبکه و سیستم کنترل در سناریو اول.

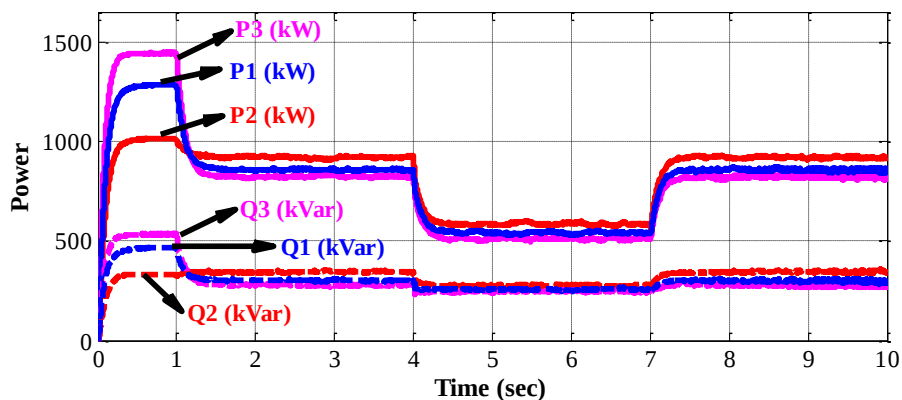
مقدار شبیه‌سازی	نماد	کمیت
20, 40, 30 $m\Omega$	R_1, R_2, R_3	مقاومت خطوط
3, 4.5, 1.5 mH	L_1, L_2, L_3	اندوکتانس خطوط
120 μF	C	فیلتر خازنی
4 mH	L	فیلتر سلفی
3500 V	E_n	ولتاژ نامی
60 Hz	f_n	فرکانس نامی
10 kV	V_{dc}	ولتاژ مستقیم خروجی DG
7.8 Wb	$ \psi^n $	دامنه شار نامی
1350, 16200, 9450 kW	P_1, P_2, P_3	توان اکتیو نامی
500, 600, 350 kVar	Q_1, Q_2, Q_3	توان راکتیو نامی
$-1.67 \times 10^{-7} \text{ rad / W}$	m	شیب مشخصه افتی $P - \delta$
$-1.65 \times 10^{-6} \text{ rad / W}$	n	شیب مشخصه افتی $Q - \psi $
12×10^{-5}	k_p	بهره جبران‌سازی در حلقه کنترل $P - \delta$
1×10^{-5}	k_q	بهره جبران‌سازی در حلقه کنترل $Q - \psi $

منجر به خطای تقسیم توان اکتیو و راکتیو خواهد شد. در روش CD-VI، اگرچه، DG2 که ظرفیت بیشتری دارد، سهم بیشتری در تقسیم توان ایفا می‌کند، اما توان تولیدی تمامی واحدهای DG، به طور محسوسی افت می‌کند. در نتیجه ممکن است بارهای ریزشبکه به طور مناسبی تغذیه نشوند. اما در روش پیشنهادی، نسبت مشارکت واحدهای DG در تامین بار ریزشبکه، متناسب با ظرفیت نامی آنها خواهد بود. در نتیجه، تقسیم توان با دقت بالایی انجام می‌شود و بارهای شبکه تامین می‌شوند.

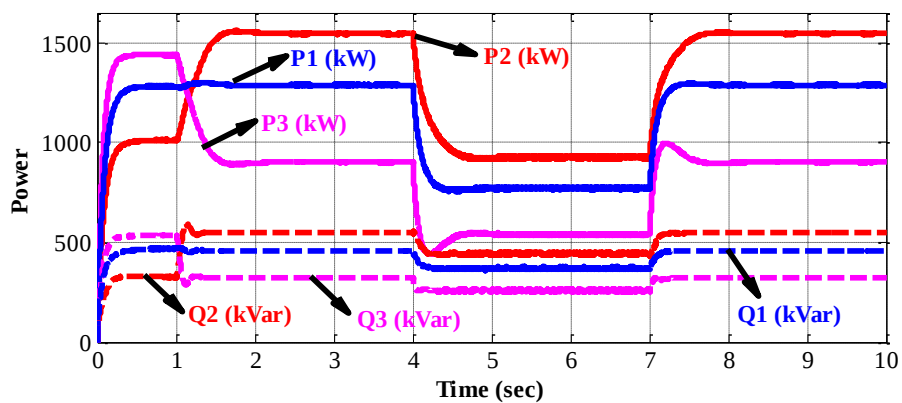
ولتاژ PCC، بر اساس روش CD-VI و روش پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۳-۱۵) و (۳-۱۶) نشان داده شده‌اند. توجه شود که روش‌های اشاره شده در لحظه $t=1s$ فعال می‌شوند. همانطور که ملاحظه می‌شود، کنترل ولتاژ بر اساس روش CD-VI، نامناسب است و یکی از دلایل افت توان تولیدی در واحدهای DG مربوط به کنترل نامناسب ولتاژ و به عبارت دیگر افت ناگهانی ولتاژ است. اما در روش پیشنهادی، ولتاژ در محدوده مجاز کنترل می‌شود. بدین ترتیب کارایی روش پیشنهادی در کنترل ولتاژ تایید می‌شود.



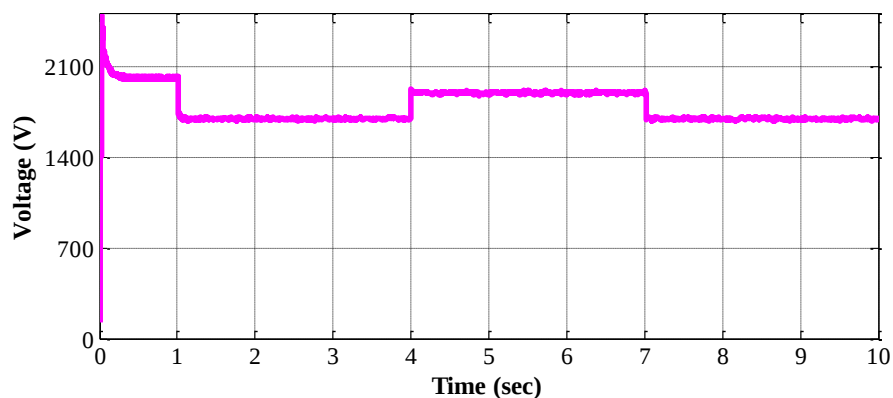
شکل (۳-۱۲): تقسیم توان بر اساس روش VFD متداول در سناریو اول.



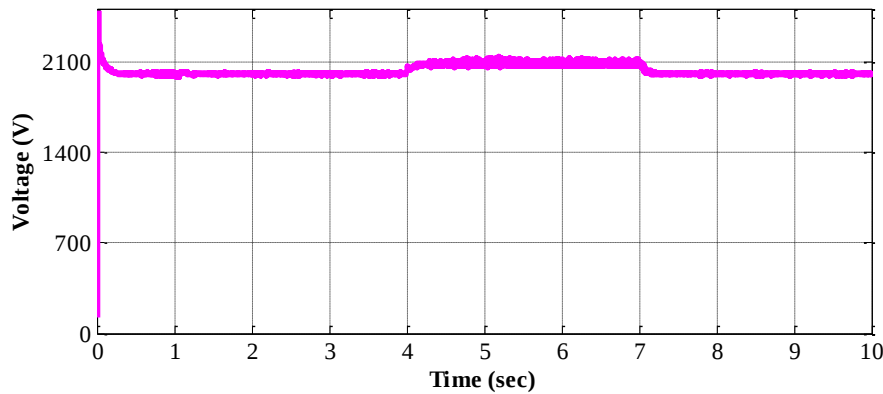
شکل (۳-۱۳): تقسیم توان بر اساس روش CD-VI در سناریو اول.



شکل (۳-۱۴): تقسیم توان بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو اول.



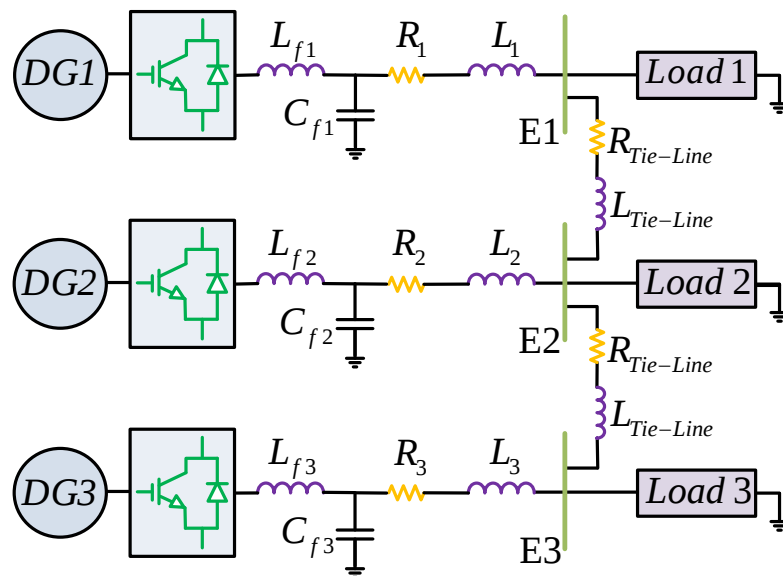
شکل (۳-۱۵): ولتاژ PCC (استراتژی CD-VI در لحظه $t=1s$ فعال می شود) در سناریو اول.



شکل (۳-۱۶): ولتاژ PCC (استراتژی RVFD پیشنهادی در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو اول.

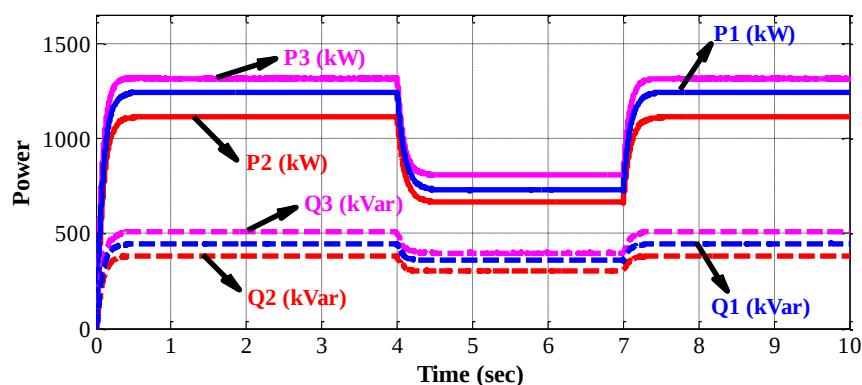
سناریو دوم: ظرفیت واحدهای DG نابرابر با حضور خطوط ارتباطی در ریزشکبه و استفاده از بارهای محلی

ریزشکبه جزیره‌ای با در نظر گرفتن سه واحد DG و خطوط ارتباطی مطابق شکل (۳-۱۷) در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی می‌شود. پارامترهای ریزشکبه و سیستم کنترل مشابه جدول (۳-۲) هستند. علاوه، مقاومت خط اتصال ($R_{tie-line}$) و اندوکتانس خط اتصال ($L_{tie-line}$) به ترتیب برابر با $75\ m\Omega$ و $10\ mH$ هستند. ظرفیت نامی واحدهای DG2 و DG3 به ترتیب $1/2$ و $0/7$ برابر نسبت به ظرفیت نامی واحد DG1 در نظر گرفته می‌شوند. به طور مشابه، بار شماره ۲ و بار شماره ۳ نیز با نسبت‌های $1/2$ و $0/7$ نسبت به بار شماره ۱ در نظر گرفته می‌شوند. بارهای ریزشکبه به صورت پله‌ای در لحظه $t=4\ s$ کاهش می‌یابند و مجدد در لحظه $t=7\ s$ به مقدار اولیه افزایش می‌یابند.

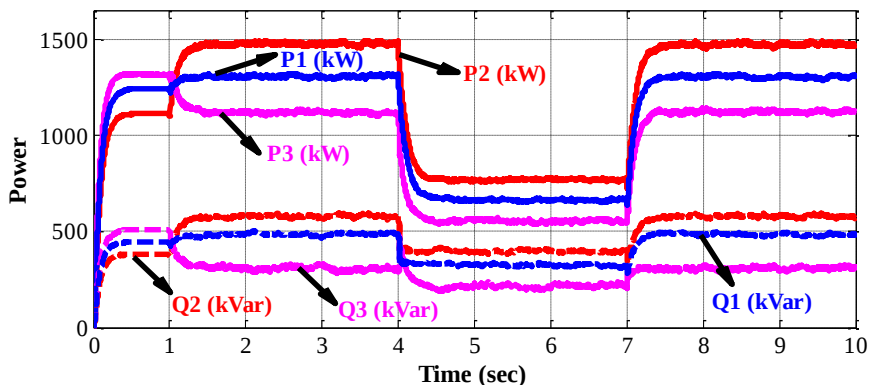


شکل (۳-۱۷): دیاگرام شماتیک ریزشکبه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو دوم.

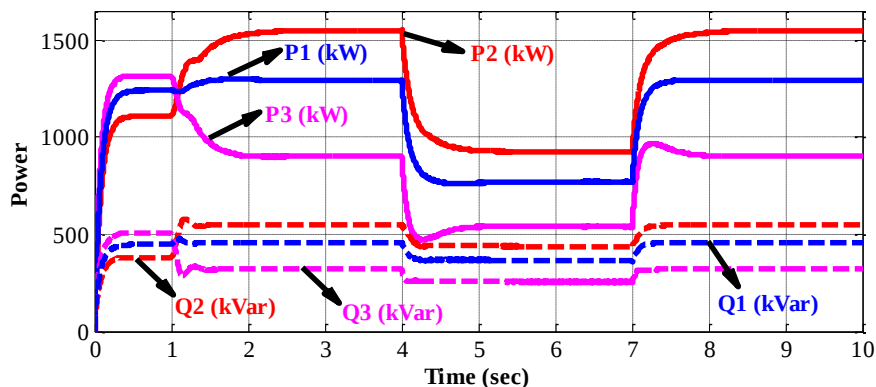
شکل‌های (۳-۱۸) تا (۳-۲۰) به ترتیب توان تزریقی واحدهای DG به ریزشبه را بر اساس روش VFD متداول، روش CD-VI و روش پیشنهادی نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود، خطای تقسیم توان در روش VFD قابل توجه است و واحد DG با ظرفیت کمتر، مشارکت بیشتری در تامین توان بارهای ریزشبه دارد. در روش CD-VI، اگرچه واحد DG با ظرفیت نامی بزرگتر مشارکت بیشتر در تامین توان بارهای ریزشبه دارد، اما تقسیم توان متناسب با ظرفیت واحدهای DG نیست و بنابراین خطای تقسیم توان قابل توجه است. اما در روش پیشنهادی، تقسیم توان متناسب با ظرفیت واحدهای



شکل (۳-۱۸): تقسیم توان بر اساس روش VFD متداول در سناریو دوم.



شکل (۳-۱۹): تقسیم توان بر اساس روش CD-VI در سناریو دوم.

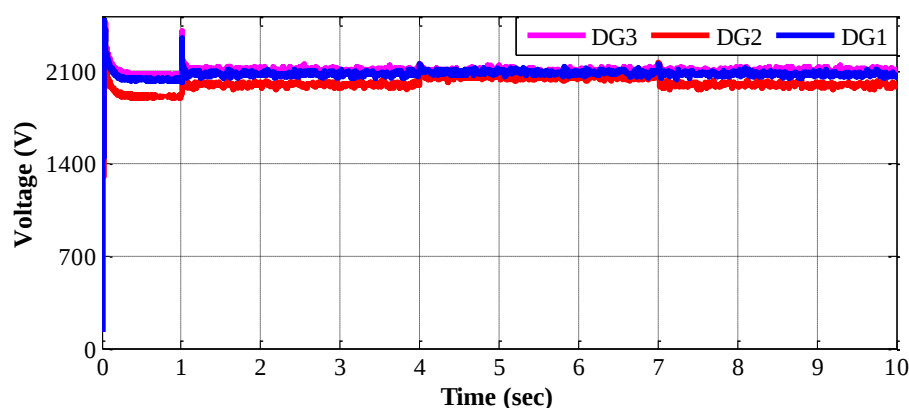


شکل (۳-۲۰): تقسیم توان بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو دوم

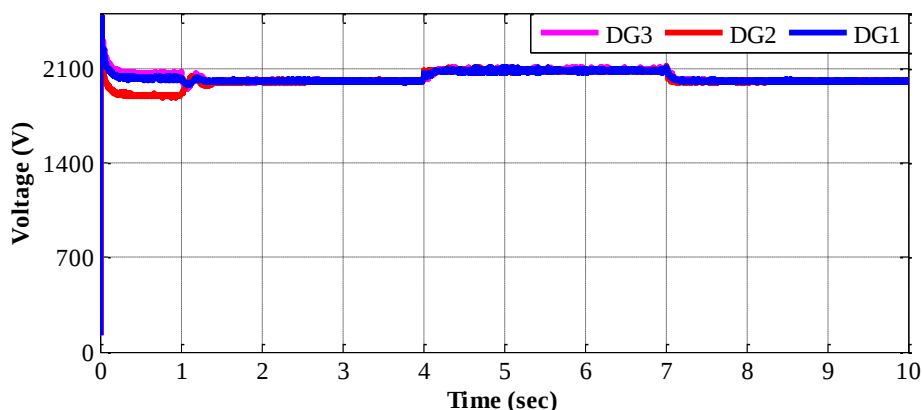
DG انجام می‌شود و تمامی واحدهای DG متناسب با ظرفیت خود در تقسیم توان مشارکت می‌کنند و بنابراین خطای تقسیم توان، بسیار ناچیز خواهد بود.

شکل‌های (۲۱-۳) و (۲۲-۳) به ترتیب ولتاژهای طرف بار را برای روش CD-VI و روش پیشنهادی نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود، بعد از فعال‌سازی روش پیشنهادی، ولتاژهای طرف بار برابر می‌شوند، در صورتی که در روش CD-VI، بین ولتاژهای طرف بار اختلاف وجود دارد. بنابراین کارایی روش پیشنهادی در کنترل ولتاژ نیز تایید می‌شود.

شکل‌های (۲۳-۳) تا (۲۵-۳) جریان‌های تزریقی واحدهای DG را در حالت نامی به ترتیب برای روش VFD، روش CD-VI و روش پیشنهادی، نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن این نکته که ظرفیت واحدهای DG2 و DG3 به ترتیب برابر با $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{7}$ نسبت به DG1 هستند، در صورت کنترل مناسب

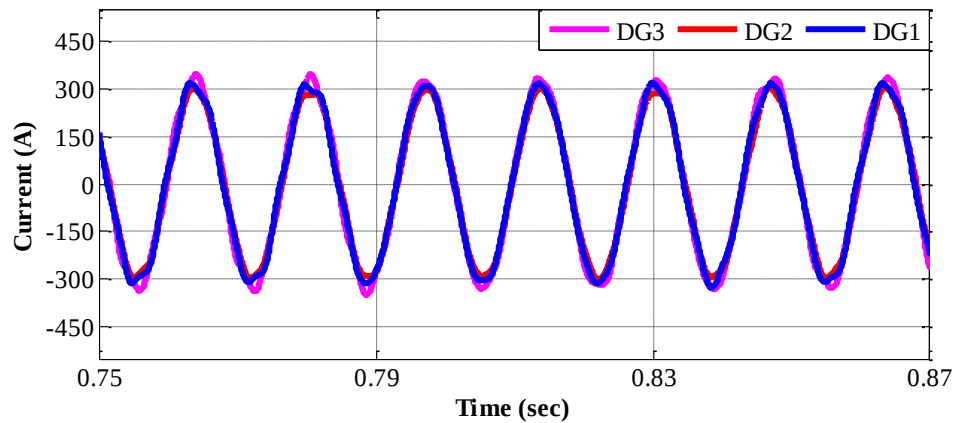


شکل (۲۱-۳): ولتاژهای طرف بار (استراتژی CD-VI در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو دوم.

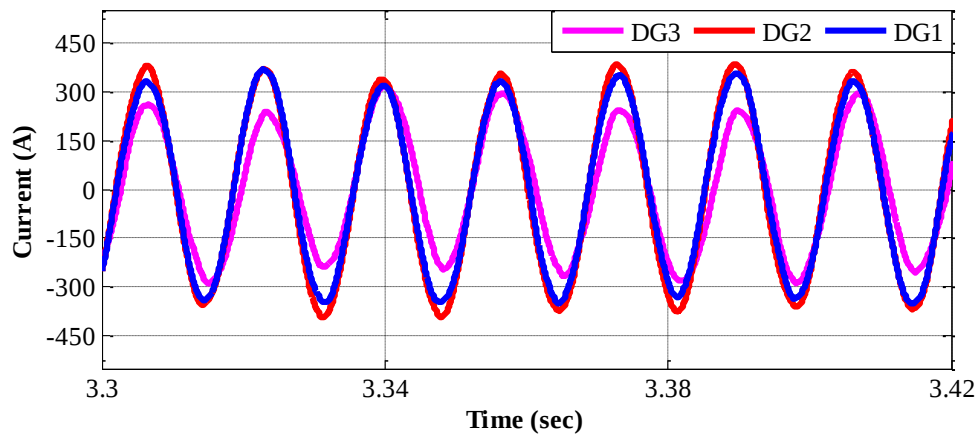


شکل (۲۲-۳): ولتاژهای طرف بار (استراتژی RVFD پیشنهادی در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو دوم.

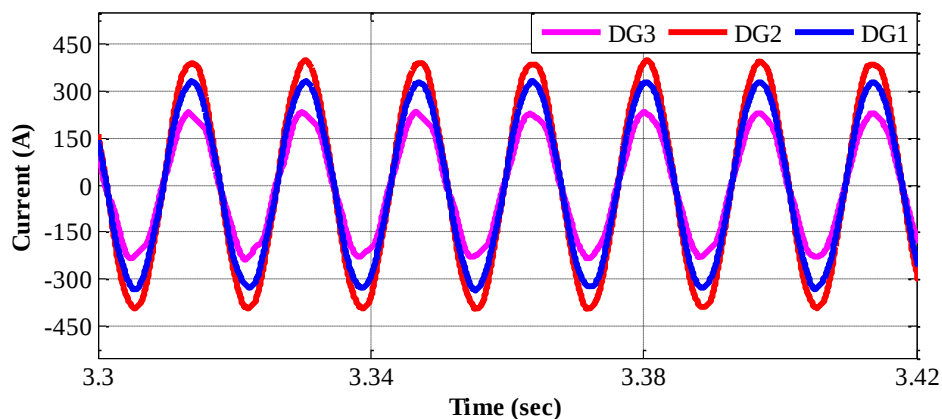
ولتاژ، انتظار می‌رود که جریان تزریقی واحدهای DG نیز متناسب با ظرفیت آن‌ها باشد، با در نظر گرفتن شکل‌های (۲۱-۳) و (۲۲-۳) که عملکرد مناسب روش پیشنهادی در کنترل ولتاژ باس‌های طرف بار را نشان می‌دهند، ملاحظه می‌شود که تنها در روش پیشنهادی، جریان‌های تزریقی به ریزشکبه متناسب با ظرفیت واحدهای DG است که این امر کارایی روش پیشنهادی را تایید می‌کند.



شکل (۲۳-۳): جریان‌های تزریقی به ریزشکبه بر اساس روش VFD متداول در سناریو دوم.



شکل (۲۴-۳): جریان‌های تزریقی به ریزشکبه بر اساس روش CD-VI در سناریو دوم.

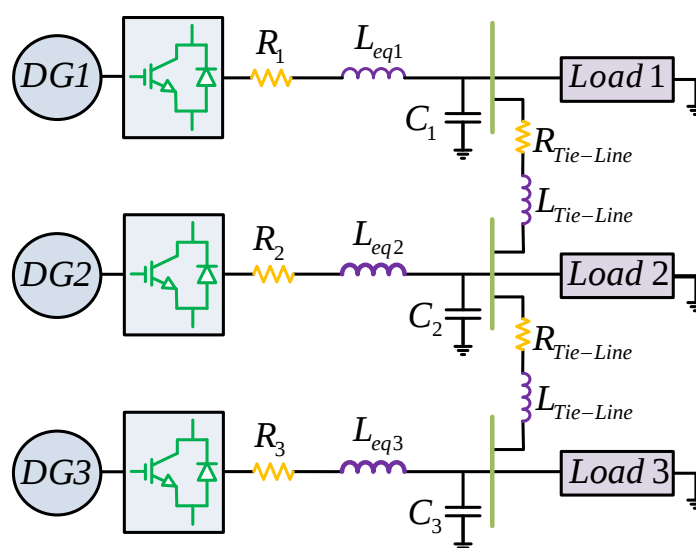


شکل (۲۵-۳): جریان‌های تزریقی به ریزشکبه بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو دوم.

سناریو سوم: ظرفیت واحدهای DG برابر با حضور خطوط ارتباطی در ریزشبهه و استفاده از بارهای محلی برابر

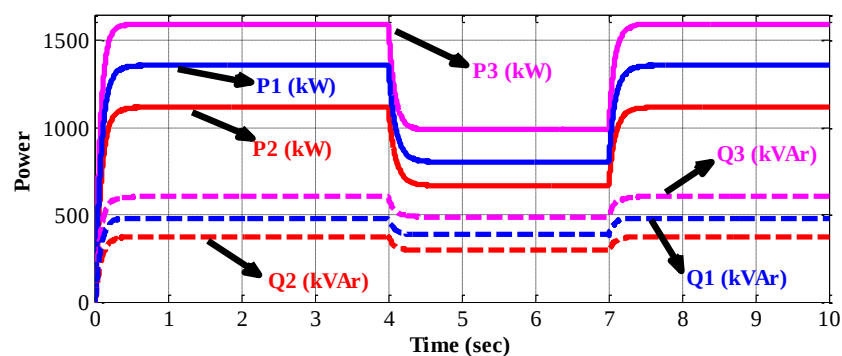
یک ریزشبهه جزیره‌ای شامل سه واحد DG مبتنی بر اینورتر که از طریق خطوط ارتباطی به یکدیگر متصل می‌شوند، مشابه شکل (۳-۲۶) در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی می‌شود. پارامترهای ریزشبهه و سیستم کنترل مشابه جدول (۳-۲) هستند. بعلاوه، مقاومت ($R_{tie-line}$) و اندوکتانس ($L_{tie-line}$) خطوط اتصال به ترتیب برابر با $75\ m\Omega$ و $10\ mH$ هستند. اندوکتانس فیلتر به صورت کمیت L_{eq} مدل سازی می‌شوند [۷]. بدون از دست دادن جامعیت مسئله، فرض می‌شود که هر سه منبع دارای توان نامی یکسانی هستند؛ به طوری که توان نامی اکتیو برابر با $1350\ kW$ و توان نامی راکتیو برابر با $500\ kVar$ هستند. طرح کنترل ریزشبهه پیشنهادی با روش متداول کنترل VFD و همچنین روش مشخصه افتی متداول مبتنی بر $P-\omega$ و $Q-V$ که از امپدانس مجازی بهره می‌برد، مقایسه می‌شوند.

توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی واحدهای DG بر اساس روش VFD متداول، روش مشخصه افتی متداول با بهره‌گیری از ایده امپدانس مجازی و همچنین استراتژی کنترل پیشنهادی RVFD به ترتیب در شکل‌های (۳-۲۷) تا (۳-۲۹) نشان داده شده است. یک کاهش و یک افزایش پله‌ای در بار مجموع به ترتیب در لحظات $t=4s$ و $t=7s$ رخ داده است. هر دو روش مشخصه افتی متداول و روش RVFD

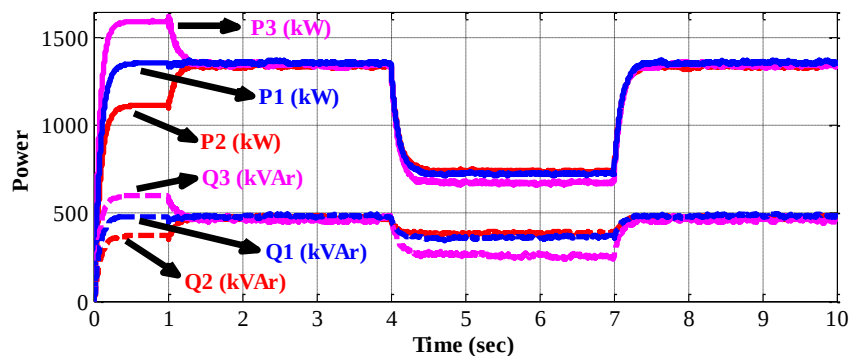


شکل (۳-۲۶): دیاگرام شماتیک ریزشبهه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو سوم.

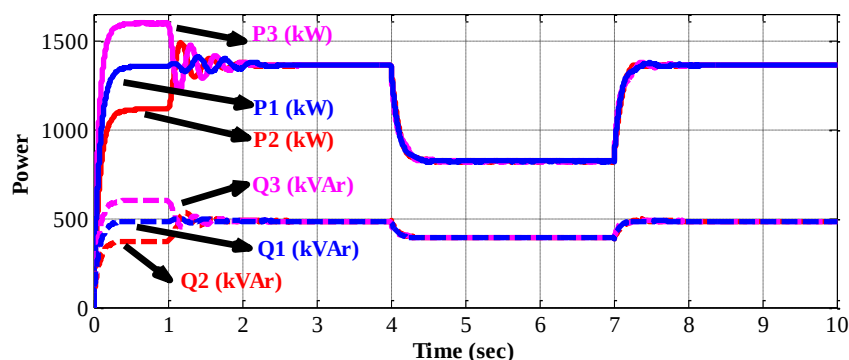
پیشنهادی، در لحظه $t=1s$ فعال می‌شوند. همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود. استفاده از روش VFD متداول، منجر خطای تقسیم توان اکتیو و راکتیو قابل توجهی بین منابع می‌شود. با وجود اینکه روش CD-VI خطای تقسیم توان بین منابع را کاهش می‌دهد، اما این روش به اندازه کافی موثر نیست و حتی هنگامی که توان مورد نیاز بار در بازه زمانی $t=4s$ تا $t=7s$ کاهش می‌کند، خطای تقسیم توان بین منابع بیشتر هم می‌شود. اما روش RVFD پیشنهادی به خوبی می‌تواند بر مشکل نابرابری امپدانس خطوط غلبه کند و توان مورد نیاز بار را به طور صحیح بین منابع تقسیم کند؛ حتی با وجود تغییر بار در بازه زمانی $t=4s$ تا $t=7s$ که این امر کارایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲۷): تقسیم توان بر اساس روش VFD متداول در سناریو سوم.

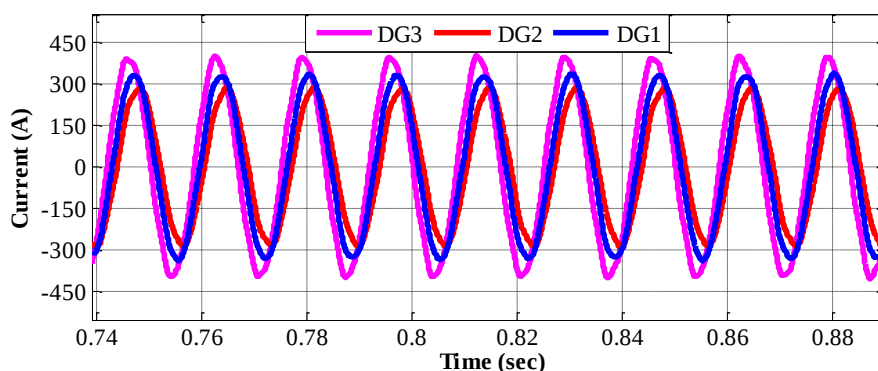


شکل (۳-۲۸): تقسیم توان بر اساس روش CD-VI در سناریو سوم.

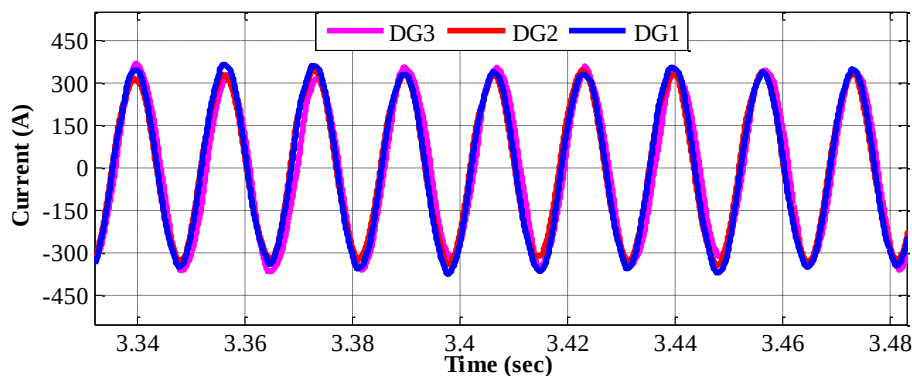


شکل (۳-۲۹): تقسیم توان بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو سوم.

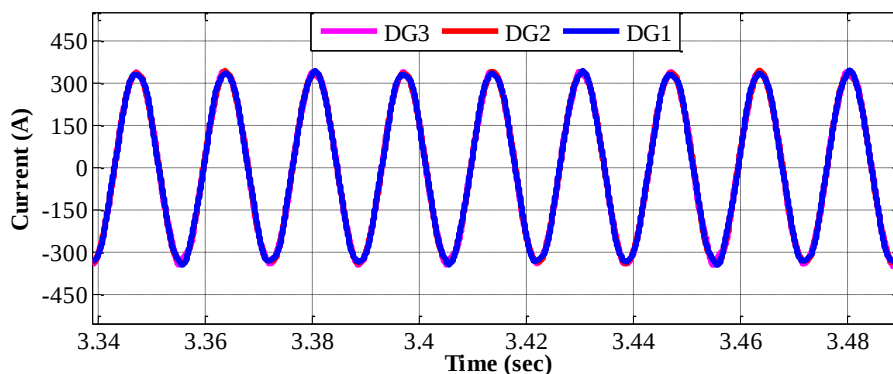
شکل‌های (۳-۳۰) تا (۳-۳۲)، جریان‌های تزریقی هر واحد DG به ریزشبه را به ترتیب برای روش متداول VFD، روش CD-VI و روش RVFD نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۳-۳۰)، جریان تزریقی واحدهای DG با یکدیگر برابر نیستند که نشان می‌دهد تقسیم توان نادرست است. با در نظر گرفتن شکل (۳-۳۱)، اگرچه فعال‌سازی روش CD-VI در لحظه $t=1s$ تا حدودی اختلاف بین دامنه و زاویه فاز جریان‌های تزریقی DG ها را کاهش می‌دهد، با این وجود، باز هم اختلاف بین دامنه و زاویه فاز جریان‌های تزریقی، قابل توجه است و بنابراین روش CD-VI هم نمی‌تواند عملکرد مناسبی ارائه دهد.



شکل (۳-۳۰): جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس روش VFD متداول در سناریو سوم.



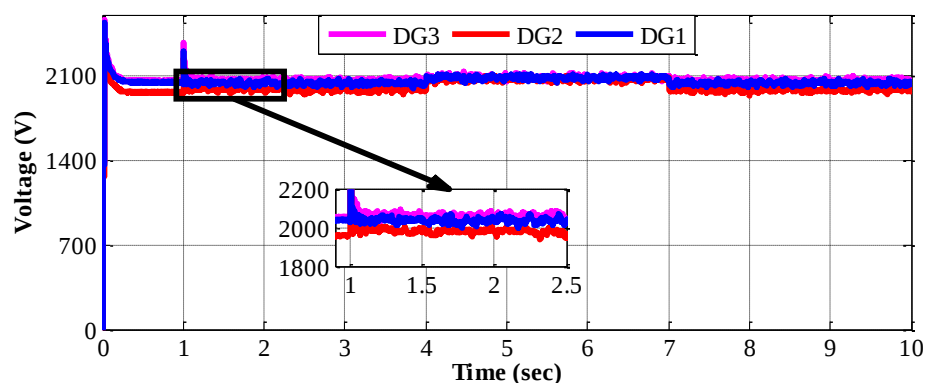
شکل (۳-۳۱): جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس روش CD-VI در سناریو سوم.



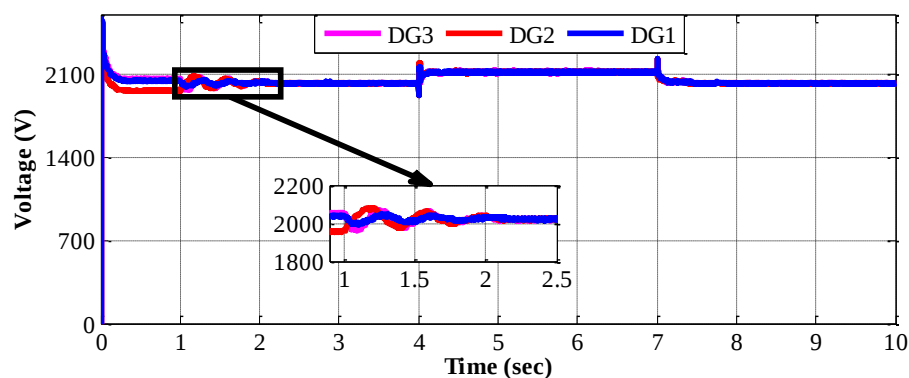
شکل (۳-۳۲): جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در سناریو سوم.

اما همانطور که در شکل (۳-۳۲) دیده می‌شود، جریان‌های تزریقی به PCC، کاملاً از نظر دامنه و زاویه فاز مشابه یکدیگر هستند. بنابراین روش RVFD پیشنهادی منجر به بهبود قابل توجهی در تقسیم جریان می‌شود.

شکل‌های (۳-۳۳) و (۳-۳۴)، ولتاژهای طرف بار را به ترتیب برای روش متداول CD-VI و همچنین روش پیشنهادی RVFD نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که این روش‌ها در لحظه $t=1s$ فعال می‌شوند. قبل از لحظه $t=1s$ ، اختلاف ولتاژ بین باس‌های ۱ و ۲، تقریباً قابل صرف‌نظر کردن هستند، اما اختلاف ولتاژ بین باس‌های ۱ و ۳ در حدود ۱۰۰ ولت است. اگرچه بعد از فعال‌سازی روش CD-VI، کنترل ولتاژ ریزشبه بهبود می‌یابد؛ با این وجود، اختلاف ولتاژ بین باس‌های ریزشبه همچنان وجود دارد و انحرافات ولتاژ مشهود هستند. برخلاف روش CD-VI، در روش RVFD اختلاف ولتاژ بین باس‌های مختلف ریزشبه کاهش می‌یابد و به سمت صفر میل می‌کنند. همچنین مشکل انحرافات ولتاژ رخ نمی‌دهد. به



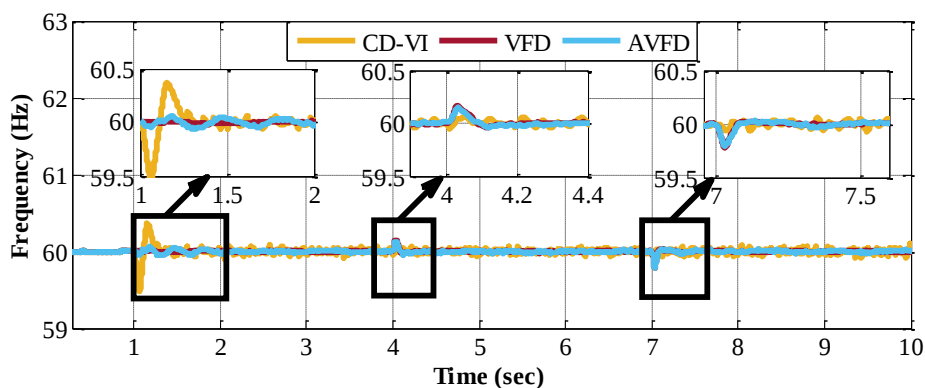
شکل (۳-۳۳): ولتاژهای طرف بار (روش CD-VI در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو سوم.



شکل (۳-۳۴): ولتاژهای طرف بار (استراتژی RVFD پیشنهادی در لحظه $t=1s$ فعال می‌شود) در سناریو سوم.

بیان دیگر، با توجه به اینکه عبارت‌های آخر در روابط (۳-۳۶) و (۳-۳۷) به صورتی اعمال شده‌اند که اثراتی مشابه اثرات امپدانس مجازی فرضی بر روی پارامترهای تنظیم یعنی δ_i و $|\bar{V}_i|$ تولید کنند، روش پیشنهادی RVFD به طور غیرمستقیم کنترل ولتاژ طرف بار را بهبود می‌دهد. در نتیجه، برای خطی که امپدانس فیزیکی کوچکتری دارد، امپدانس مجازی افزایش می‌یابد و برای خطی که امپدانس فیزیکی بزرگتری دارد، امپدانس مجازی کاهش می‌یابد. بنابراین، استراتژی کنترل RVFD پیشنهادی می‌تواند تاثیر نابرابری امپدانس خطوط در ولتاژ طرف بار را برطرف کند و حتی در شرایطی که بارهای ریزشبه در بازه زمانی $t=7s$ تا $t=4s$ تغییر کرده‌اند، به خوبی قادر به کنترل ولتاژ است. این نکته کارایی روش پیشنهادی را در کنترل ولتاژ اثبات می‌کند.

شکل (۳-۳۵) فرکانس ریزشبه را نشان می‌دهد. در لحظه $t=1s$ هنگامی که روش‌های CD-VI و RVFD اعمال می‌شوند، نوساناتی در حالت گذرا دیده می‌شود؛ اما کنترل فرکانس بهتر بر مبنای کنترل اختلاف زاویه‌ای بین شارهای مجازی اینورتر و باس طرف بار برای روش VFD متداول و روش RVFD پیشنهادی سبب می‌شود که دامنه نوسانات نسبت به روش CD-VI بسیار کمتر باشد. بعلاوه، انحرافات فرکانس در حالت دائمی، برای روش‌های VFD متداول و RVFD پیشنهادی نیز نسبت به روش CD-VI بسیار کمتر هستند. بعلاوه، هنگامی که توان مورد نیاز بار در بازه زمانی $t=7s$ تا $t=4s$ تغییر می‌کند، دامنه نوسانات فرکانس زیاد نیست. بنابراین روش RVFD پیشنهادی عملکرد مناسبی در کنترل فرکانس نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳۵): فرکانس ریزشبه در سناریو سوم.

۳-۷-۲- مقایسه نتایج

در این بخش، ارزیابی کمی عملکرد روش RVFD پیشنهادی در شرایط نابرابری امپدانس‌های خط در مقایسه با روش VFD متداول و روش CD-VI بر اساس سناریوی سوم ارائه می‌شود. بر اساس تحلیل‌های شبیه‌سازی، نتایج مقایسه در جدول (۳-۳) آمده است. f_{err} و V_{err} به ترتیب اندازه انحرافات ولتاژ و فرکانس در حالت دانه می هستند. بعلاوه، THD_v و THD_c به ترتیب شاخص‌های THD ولتاژ طرف بار و جریان تزریقی منابع به ریزشبه هستند. برای محاسبه خطای توان‌های اکتیو و راکتیو نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Q_{err,i} = \frac{Q_i - Q_i^{exp}}{Q_i^{exp}} \times 100 \quad (۷۳-۳)$$

$$P_{err,i} = \frac{P_i - P_i^{exp}}{P_i^{exp}} \times 100 \quad (۷۴-۳)$$

که Q_i و P_i به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیوی هستند که منابع به ریزشبه تزریق می‌کنند. همچنین، Q_i^{exp} و P_i^{exp} به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیوی هستند که انتظار می‌رود تا منابع تولید کنند. با توجه به این فرض که ظرفیت تولید همه منابع یکسان است، توان تحویلی منبع شماره ۱، به عنوان توان تحویلی مورد انتظار برای تمامی منابع در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به شکل‌های (۳-۱۸) تا (۳-۲۰)، Q_{err} و P_{err} در بازه زمانی کاهش توان درخواستی بار از مقدار نامی تغییر می‌کنند. همانطور که مشاهده می‌شود، خطای تقسیم توان برای روش VFD قابل توجه است. عملکرد روش کنترل CD-VI در شرایط نامی قابل قبول است و در این شرایط خطای تقسیم توان در حدود ۲ درصد است. با این حال، خطاهای تقسیم توان (به ویژه خطای تقسیم توان راکتیو) هنگامی که توان مورد نیاز بار تغییر می‌کند، افزایش می‌یابد. در طرف مقابل، روش RVFD پیشنهادی در مقایسه با دو روش دیگر، حتی در شرایط تغییر بار نسبت به شرایط نامی، عملکرد بسیار مطلوبی دارد. قابل توجه است که موارد مربوط به $Q_{err,1,2}$ و $P_{err,1,2}$ در جدول (۳-۳)، مربوط به شرایطی است که توان مورد نیاز بار کاهش یافته است.

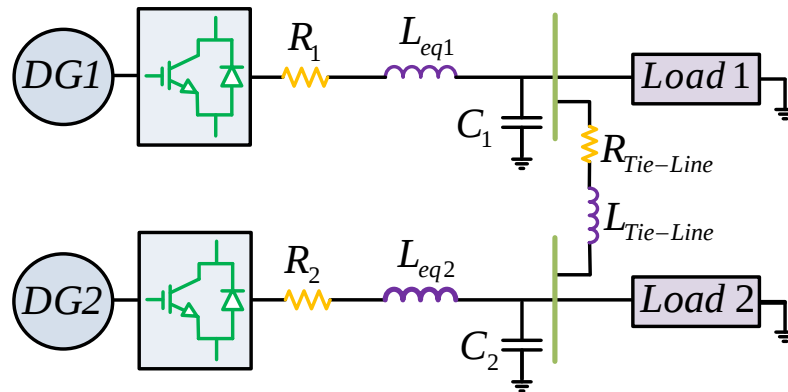
مطابق شکل‌های (۳۰-۳) تا (۳۲-۳)، نابرابری امپدانس خطوط و در نتیجه تقسیم توان نادرست منجر به جریان‌های نابرابر در خطوط می‌شود. در این شرایط، جریان بیشتری از خط با اندوکتانس کوچکتر عبور می‌کند و در نتیجه شاخص THD بدتر می‌شود. بعلاوه، با وجود استفاده از سیگنال‌های پس‌خور متعدد و وجود چندین حلقه کنترل، روش CD-VI دارای مشکل انحرافات ولتاژ و فرکانس است و دقت عملکرد این ساختار کنترلی وابسته به کیفیت عملکرد حلقه کنترل جریان است که از کنترل‌کننده‌های PI استفاده می‌کند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های THD در روش CD-VI بیشتر از روش‌های مبتنی بر شار مجازی هستند. بعلاوه، استراتژی کنترل RVFD پیشنهادی، با جبران‌سازی اثرات نامطلوب نابرابری امپدانس خطوط بر روی متغیرهای کنترل یعنی $d\delta$ و $d\Psi$ تقسیم توان صحیح و متناسب با ظرفیت واحدهای DG را محقق می‌کند. همچنین، نوسان فرکانس کمتر و کنترل ولتاژ و جریان نیز بهبود می‌یابند.

جدول (۳-۳) مقایسه عددی بین استراتژی RVFD پیشنهادی و روش‌های متداول بر اساس سناریو سوم.

روش	f_{err}	$E_{err} \%$	$P_{err,1,2}$	$Q_{err,1,2}$	THD_v	THD_c
VFD	0.01	4.87	17.5, 17.8	25.4, 22.6	3.23	2.55
CD-VI	0.05	3.75	25, 24.4	22.6, 23.2	3.39	4.63
RVFD	0.02	<1	-	-	2.08	1.70

۳-۸- پیاده‌سازی عملی روش پیشنهادی

به منظور اعتبارسنجی عملکرد استراتژی کنترل پیشنهادی، یک ریزشبکه جزیره‌ای با آرایش موازی که شامل دو واحد DG اینورتری است و ظرفیت هر دو منبع مشابه یکدیگر هستند، مشابه شکل (۳۶-۳) در نظر گرفته می‌شود و در آزمایشگاه ساخته می‌شود. شکل (۳۷-۳)، این ریزشبکه جزیره‌ای را نشان می‌دهد. پارامترهای این ریزشبکه مشابه جدول (۴-۳) هستند. لازم به ذکر است که امپدانس خطوط در ریزشبکه‌های ولتاژ بالا، اندوکتیو است؛ اما به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی، سطح ولتاژ ریزشبکه پایین است و امپدانس خطوط به صورت تعمدی، اندوکتیو در نظر گرفته می‌شود. منابع DC برای اینورترها از طریق یک اتوترانسفورماتور سه فاز و دو منبع یکسوکننده سه فاز که به ثانویه آن متصل

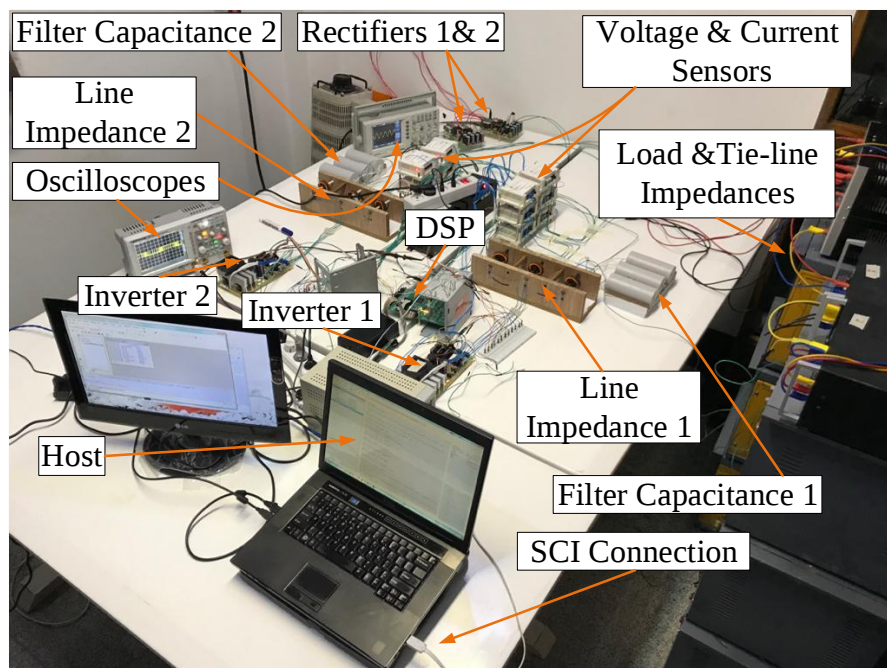


شکل (۳-۳۶): دیاگرام شماتیک نمونه آزمایشگاهی ریزشبکه جزیره‌ای مورد مطالعه.

جدول (۳-۴): پارامترهای آزمایشگاهی برای ریزشبکه و سیستم کنترل.

مقدار آزمایشگاهی	نماد	کمیت
$40, 40 \text{ m}\Omega$	R_1, R_2	مقاومت خطوط
$2, 4 \text{ mH}$	L_1, L_2	اندوکتانس خطوط
$75 \text{ m}\Omega$	$R_{tie-line}$	مقاومت خط اتصال
10 mH	$L_{tie-line}$	اندوکتانس خط اتصال
$100 \text{ }\mu\text{F}$	C	فیلتر خازنی
4 mH	L	فیلتر سلفی
155 V	E_n	ولتاژ نامی
60 Hz	f_n	فرکانس نامی
250 V	V_{dc}	ولتاژ مستقیم خروجی DG
0.42 Wb	$ \psi^n $	دامنه شار نامی
220 W	P_n	توان اکتیو نامی
145 VAR	Q_n	توان راکتیو نامی
$-12 \times 10^{-5} \text{ rad / W}$	m	شیب مشخصه افقی $P-\delta$
$-4 \times 10^{-4} \text{ rad / W}$	n	شیب مشخصه افقی $Q- \psi $
8×10^{-4}	k_p	بهره جبران‌سازی در حلقه کنترل $P-\delta$
14×10^{-4}	k_q	بهره جبران‌سازی در حلقه کنترل $Q- \psi $

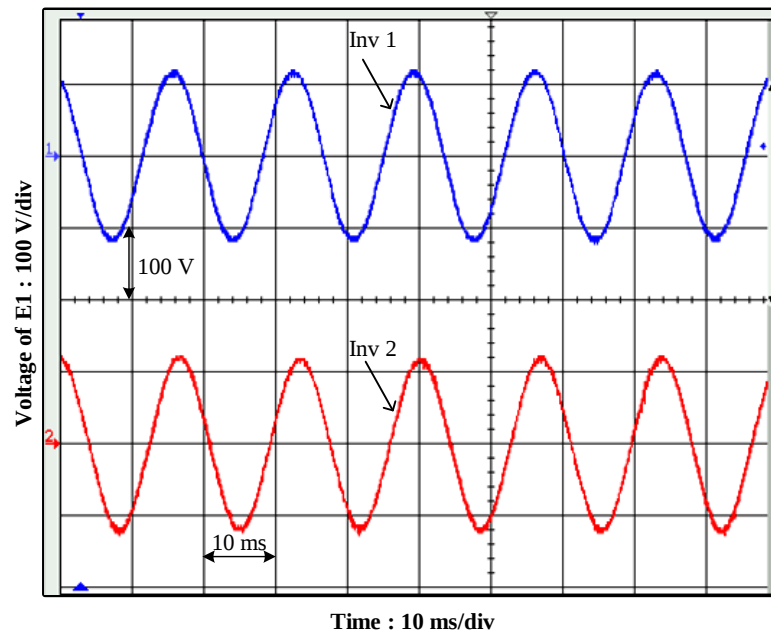
هستند، ایجاد می‌شود. کلیدهای اینورتر از نوع مازول IRGP4069D IGBT هستند. روش پیشنهادی برای کنترل اینورترها در نرم‌افزار Matlab/Simulink پیاده‌سازی می‌شود و از Matlab/Embedded Coder برای تولید کدهای مورد استفاده در نرم‌افزار Code Composer Studio استفاده می‌شود. سرانجام کدهای تولید شده روی یک DSP از نوع TMS320F28335 پیاده‌سازی می‌شود. این میکروکنترلر دارای ۶ مازول e-PWM است که هر کدام از آن‌ها دارای دو کانال معکوس یکدیگر PWM هستند و برای ارسال سیگنال‌های کلیدزنی به کلیدهای IGBT استفاده می‌شوند. همچنین از ۱۲ مبدل آنالوگ به دیجیتال برای فراهم کردن ورودی‌های استراتژی کنترل استفاده می‌شود. توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت داخلی در DSP محاسبه می‌شوند و از طریق ارتباط SCI استخراج می‌شوند. فرکانس نمونه‌برداری سیستم برابر با ۱۰ کیلوهرتز است. مقادیر L و C برای فیلتر در پیاده‌سازی عملی به ترتیب برابر با 4 mH و $100\text{ }\mu\text{F}$ انتخاب شده‌اند. در نتیجه فرکانس تشدید برابر با $251/77$ هرتز است. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، سه حالت عملکرد مختلف، در نظر گرفته می‌شود. در حالت اول، روش RVFD پس از روش VFD، فعال‌سازی می‌شود. در حالت دوم، بار به صورت پله‌ای کاهش می‌یابد و در حالت سوم بار به صورت پله‌ای به مقدار اولیه خود برمی‌گردد.



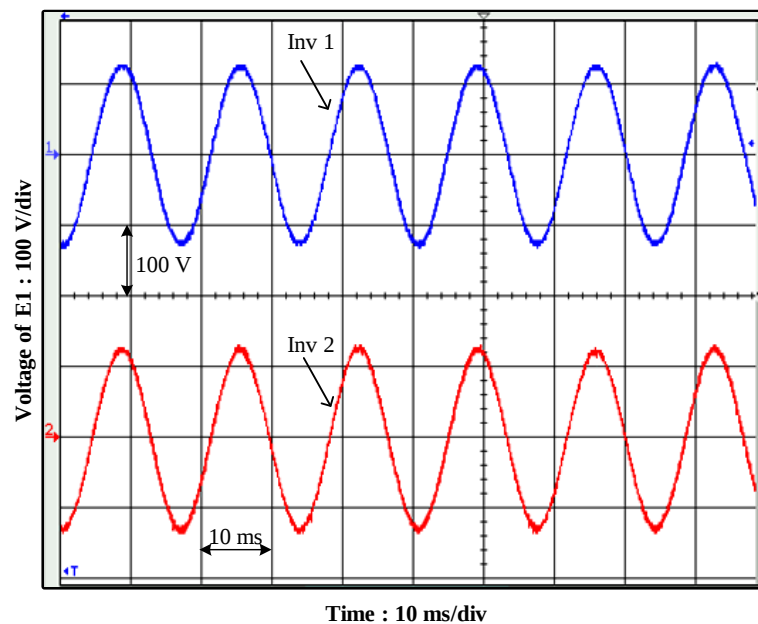
شکل (۳-۳۷): نمونه آزمایشگاهی ریز شبکه و سیستم کنترل.

۳-۸-۱- حالت اول: مقایسه بین روش RVFD پیشنهادی با VFD

برای مقایسه نتایج، ابتدا روش متداول VFD به ریزشکه اعمال می‌شود. سپس روش RVFD پیشنهادی در لحظه $t=2s$ فعال می‌شود. منحنی ولتاژ باس‌های ۱ و ۲ قبل و بعد از اعمال روش پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۳۸-۳) و (۳۹-۳) نشان داده شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود، منحنی‌ها کاملاً



شکل (۳۸-۳): منحنی‌های ولتاژ طرف بار بر اساس روش VFD متداول در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی.

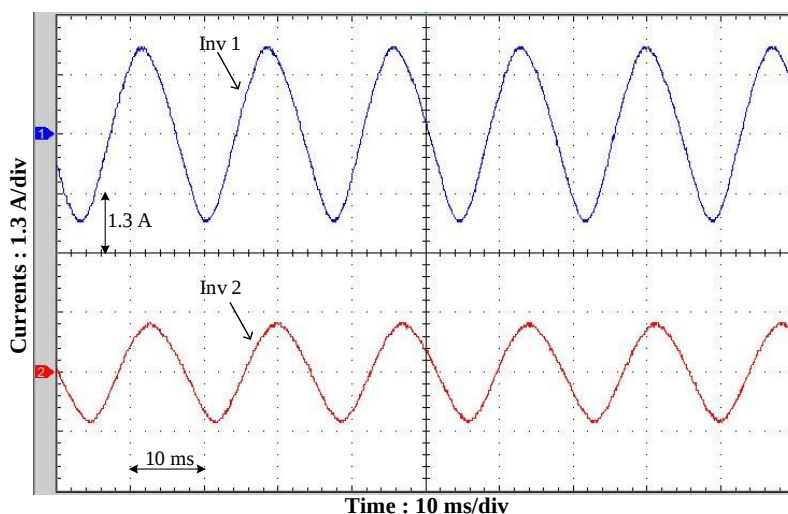


شکل (۳۹-۳): منحنی‌های ولتاژ طرف بار بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی.

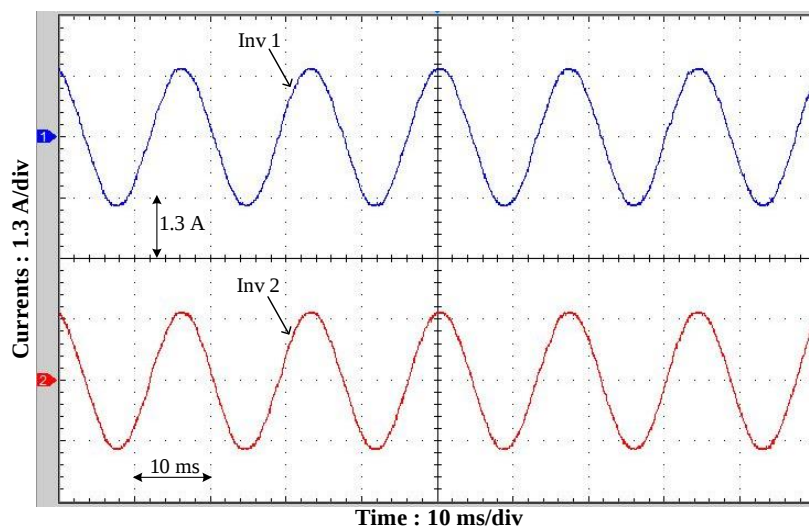
سینوسی هستند. علاوه، ولتاژهای طرف بار از نظر اندازه برابر هستند که مقدار آن حدود ۱۲۵ ولت است.

شکل‌های (۳-۴۰) و (۳-۴۱) جریان تزریقی منابع را به ترتیب قبل و بعد از اعمال روش پیشنهادی نشان می‌دهند. قبل از اعمال روش RVFD، منحنی جریان‌ها از نظر دامنه و فاز متفاوت هستند. علاوه، شاخص THD جریان برابر با ۴/۲۸ درصد است. اما بعد از اعمال روش پیشنهادی، زاویه فاز و دامنه جریان‌های تزریقی منابع برابر می‌شوند و شاخص THD جریان در این شرایط به ۳/۸۶ درصد کاهش می‌یابد.

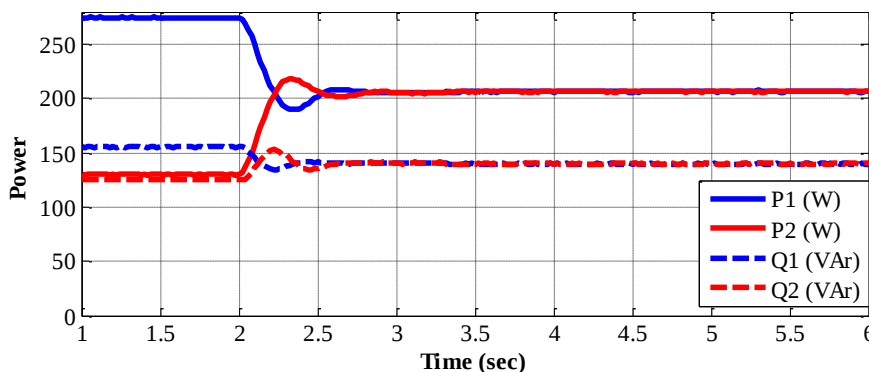
شکل (۳-۴۲)، توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی منابع را نشان می‌دهند. همانطور که پیشتر ذکر شد، اطلاعات توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی منابع از طریق ارتباط SCI دریافت می‌شوند و در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink ترسیم می‌شوند. امپدانس خط متصل به منبع شماره ۱، کوچکتر است. در نتیجه در روش VFD متداول، توان بیشتری از منبع شماره ۱ به ریزشبه تزریق می‌شود و باعث ۱۰ درصد خطای تزریق توان راکتیو و ۳۴ درصد خطای تزریق توان اکتیو خواهد شد. بعد از فعال‌سازی استراتژی کنترل RVFD پیشنهادی، امپدانس مجموع در خطی که دارای امپدانس فیزیکی کوچکتری است، افزایش می‌یابد و در خطی که امپدانس فیزیکی بزرگتری دارد، کاهش می‌یابد.



شکل (۳-۴۰): منحنی‌های جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس روش VFD متداول در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی.



شکل (۳-۴۱): منحنی‌های جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی.

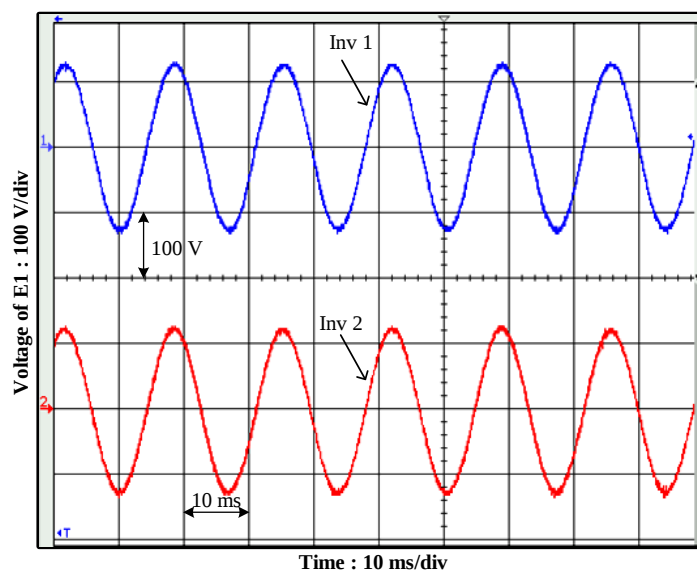


شکل (۳-۴۲): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبه در حالت اول از نتایج آزمایشگاهی.

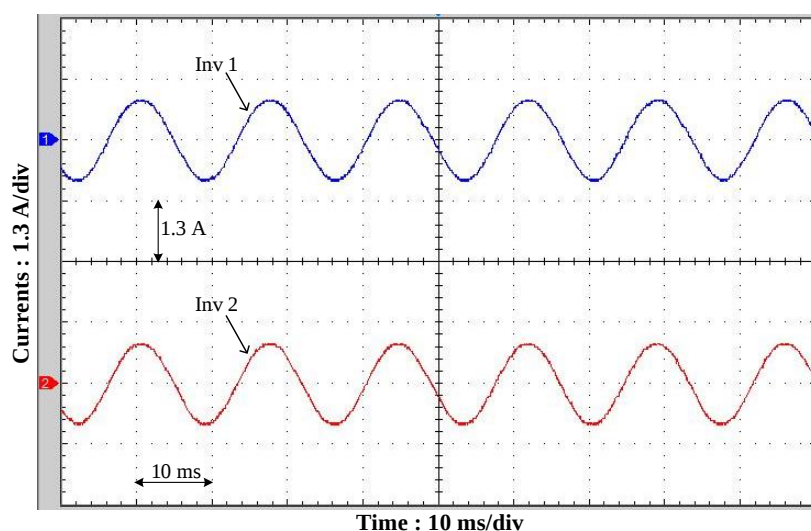
۳-۸-۲- حالت دوم: ارزیابی روش RVFD پیشنهادی در شرایط کاهش بار

در این حالت، بار به صورت پله‌ای کاهش می‌یابد، شکل (۳-۴۳) منحنی‌های ولتاژ باس‌های یک و دو را نشان می‌دهد، همانطور که دیده می‌شود، تغییرات در دامنه ولتاژ نسبت به حالت اول، بسیار ناچیز است. اگرچه به دلیل تغییرات در افت ولتاژ در امپدانس خطوط، دامنه ولتاژ اندکی افزایش می‌یابد.

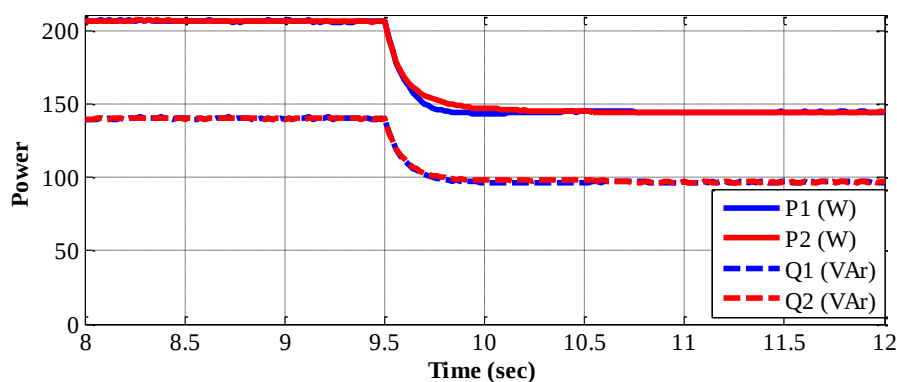
شکل (۳-۴۴)، منحنی‌های جریان تزریقی منابع به PCC را نشان می‌دهند. به دلیل کاهش بار شبکه، دامنه جریان‌ها کاهش یافته است و در نتیجه با توجه به شکل (۳-۴۵)، توان‌های تزریقی منابع نیز کاهش می‌یابد. بعلاوه، در حالت دائمی، توان‌های تزریقی منابع، مشابه یکدیگر هستند. در این حالت، شاخص THD جریان برابر با $3/75\%$ است.



شکل (۳-۴۳): منحنی‌های ولتاژ طرف بار بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در حالت دوم از نتایج آزمایشگاهی.



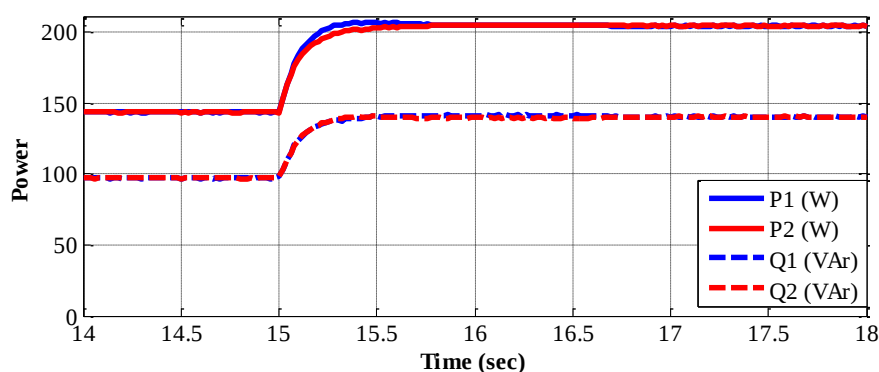
شکل (۳-۴۴): منحنی‌های جریان‌های تزریقی به ریزشبه بر اساس استراتژی RVFD پیشنهادی در حالت دوم از نتایج آزمایشگاهی.



شکل (۳-۴۵): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبه در حالت دوم از نتایج آزمایشگاهی.

۳-۸-۳- حالت سوم: ارزیابی روش RVFD پیشنهادی در شرایط افزایش بار

در این حالت، توان درخواستی بار به مقدار اولیه خود، افزایش می‌یابد، در نتیجه شکل موج‌های جریان و ولتاژ مشابه حالت اول می‌شوند و تغییرات توان تزریقی منابع به PCC مشابه شکل (۳-۴۶) خواهد بود. با توجه به این شکل، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی منابع به PCC در حالت دائم با یکدیگر برابر هستند. بنابراین کارایی روش پیشنهادی در حالت‌های مختلف اثبات می‌شود.



شکل (۳-۴۶): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبه در حالت سوم از نتایج آزمایشگاهی.

۳-۹- مبانی انتخاب پارامترهای فیلتر

در این پژوهش از یک فیلتر پایین‌گذر سلفی - خازنی (LC) که تابع تبدیل آن از مرتبه دوم است، استفاده می‌شود. در این بخش، مبانی انتخاب پارامترهای فیلتر به اختصار بیان می‌شود. شکل (۳-۴۷) دیاگرام مداری یک فیلتر مرتبه دوم را نشان می‌دهد که تابع تبدیل آن به صورت رابطه (۳-۱۰۰) است.

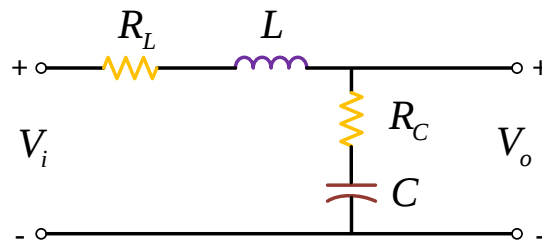
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_C C s + 1}{L C s^2 + (R_L + R_C) C s + 1} \quad (3-75)$$

V_i و V_o به ترتیب ولتاژهای ورودی و خروجی فیلتر، R_L و R_C مقاومت مسیر سلف و خازن هستند. بعلاوه، L و C نیز به ترتیب اندازه سلف و خازن فیلتر هستند. لازم به ذکر است که برای سادگی از اثرات امپدانس بار صرف‌نظر شده است. همچنین، با توجه به اینکه استراتژی ارائه‌شده در این فصل، به صورت عملی در محیط آزمایشگاه پیاده‌سازی شده است، مقادیر سلف و خازن برای فیلتر به صورتی انتخاب شده‌اند که اولاً در دسترس باشند و ثانیاً هارمونیک‌ها را به صورتی تضعیف کنند که شاخص THD در محدوده مجاز باقی بماند. بعلاوه، به دلیل متغیر بودن فرکانس کلیدزنی، (برخلاف روش‌های

با فرکانس کلیدزنی ثابت که هارمونیک‌ها در حوالی فرکانس کلیدزنی پخش می‌شوند) هارمونیک‌های ولتاژ (یا جریان) در تمام طیف فرکانسی گسترده و متغیر هستند. در این شرایط، بدترین هارمونیک‌ها بر اساس مشاهده طیف فرکانسی خروجی، برای طراحی فیلتر انتخاب می‌شوند. برای محاسبه فرکانس تشدید f_r از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (۷۶-۳)$$

مقادیر L و C برای مطالعات شبیه‌سازی به ترتیب برابر با 4 mH و $120\text{ }\mu\text{F}$ انتخاب شده‌اند. در نتیجه فرکانس تشدید برابر با $229/84$ هرتز می‌شود.



شکل (۴۷-۳): بلوک دیاگرام فیلتر پایین‌گذر LC مرتبه دوم.

با انجام تحلیل دیاگرام بُد برای فیلتر مرتبه دوم، شکل (۴۸-۳) حاصل می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود، تضعیف مناسب برای هارمونیک‌هایی با اندازه ده برابر فرکانس تشدید و در سمت راست آن فراهم می‌شود. به عبارت دیگر، اگر دامنه خروجی به ازای فرکانس تشدید برابر با v_r باشد، f_o فرکانسی باشد که باید تضعیف شود (فرکانس تضعیف) و دامنه خروجی به ازای آن برابر با v_o باشد، آنگاه نتیجه می‌شود [۴۹]:

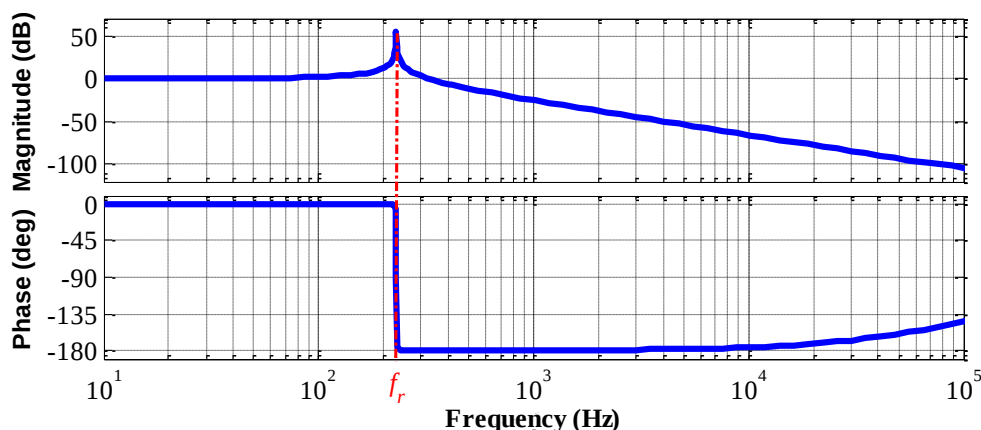
$$\text{if } \log(f_o / f_r) = 1 \text{ then } \frac{v_o}{v_r} = 0.01 \quad (۷۷-۳)$$

بنابراین، بین فرکانسی که تضعیف می‌شود و فرکانس تشدید فیلتر رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{f_o}{f_r} = 10 \quad (۷۸-۳)$$

سپس فرکانس تشدید را بر حسب فرکانس تضعیف به صورت زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$f_r = 10^{(\log f_o - 1)} \quad (۷۹-۳)$$



شکل (۳-۴۸): دیاگرام بُد برای تابع تبدیل فیلتر پایین‌گذر LC مرتبه دوم.

۳-۱۰- جمع‌بندی

در این فصل به تحلیل تاثیرات نابرابری امپدانس خطوط در عملکرد روش تقسیم توان مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی پرداخته شد. برای غلبه بر این مشکل، در این فصل یک روش اصلاحی ارائه شد که می‌تواند با الهام گرفتن از ایده امپدانس مجازی، تاثیرات نابرابری امپدانس خطوط را جبران‌سازی کند. برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی از یک جدول کلیدزنی جدید بهره برده شد. در نتیجه، یک استراتژی کنترل ساده بدون نیاز به حلقه‌های تودرتوی کنترل ولتاژ و جریان و تبدیل‌های پیچیده در قاب مرجع به دست آمد. کارایی روش پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی و همچنین یک نمونه آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی به طور موثری تاثیر نابرابری امپدانس خطوط را برطرف می‌کند و تقسیم توان صرف‌نظر از امپدانس خطوط، به طور متناسب بین منابع مبتنی بر اینورتر، انجام می‌شود.

لازم به ذکر است که در این فصل، امپدانس خطوط، تقریباً اندوکتانسی در نظر گرفته شد؛ اگرچه در ریزشبهه‌های ولتاژ بالا، این فرض صحیح است، اما در ریزشبهه‌های ولتاژ پایین، امپدانس خطوط، اهمی هستند. در نتیجه، ضرورت دارد که روابط تقسیم توان بر اساس این فرض اصلاح شوند. در همین راستا، در فصل آینده، با مقاومتی در نظر گرفتن امپدانس خطوط، یک روش جدید مبتنی بر شار مجازی ارائه خواهد شد. بعلاوه، به منظور بهبود عملکرد حلقه کنترل برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی، از روش کنترل مدل پیش‌بین شار استفاده خواهد شد.

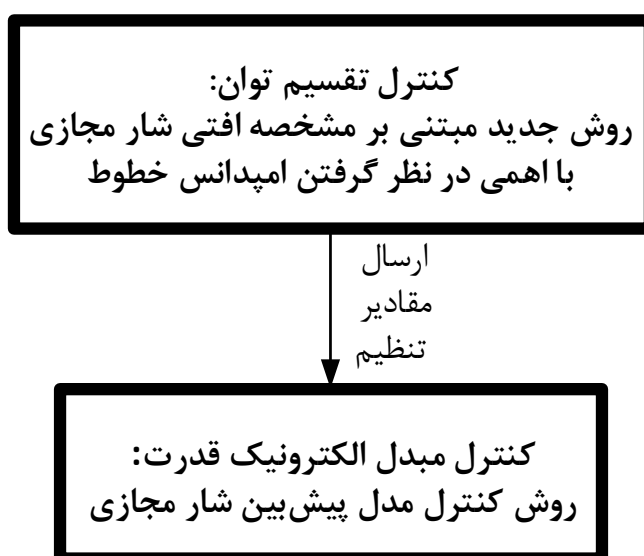
فصل چهارم:

**استراتژی پیشنهادی برای کنترل توان مبتنی بر
مشخصه افقی شار مجازی و کنترل مدل پیش‌بین شار
در ریز شبکه‌های ولتاژ پایین**

۴-۱- مقدمه

در ریزشبه‌های ولتاژ پایین که امپدانس خطوط تقریباً مقاومتی هستند، به طور متداول از تکنیک مشخصه افقی مبتنی بر روابط $P-V$ و $Q-\omega$ برای کنترل تقسیم توان بین واحدهای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. اما این روش دارای معایبی نظیر تقسیم توان اکتیو نادرست و انحرافات ولتاژ و فرکانس است. بنابراین تقسیم توان صحیح و در عین حال حفظ ولتاژ و فرکانس در محدوده مجاز، موارد چالش‌برانگیز در ریزشبه‌های مقاومتی است.

همانطور که قبلاً نیز اشاره شده است، کارهای انجام شده در این رساله در راستای کنترل توان در ریزشبه‌های جزیره‌ای در دو سطح کنترل تقسیم توان و کنترل مبدل الکترونیک قدرت آمده است. شکل (۴-۱) ساختار کنترل ریزشبه ارائه شده در این فصل را نشان می‌دهد که کارهای انجام‌شده در این فصل با قسمت پر رنگ نشان داده شده است. به منظور حل مشکلات اشاره شده در بالا، روشی جدید مبتنی بر مشخصه افقی شار مجازی ارائه می‌شود. بعلاوه، برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی از تکنیک کنترل مدل پیش‌بین بهره برده خواهد شد. استراتژی پیشنهادی دارای ساختاری ساده است و به تبدیلات پیچیده قاب مرجع نیازی ندارد. بعلاوه، نیازی به کنترل‌کننده‌های تناسبی - انتگرالی و مدولاسیون پهنای پالس سینوسی نیست.



شکل (۴-۱): ساختار ارائه شده در فصل چهارم.

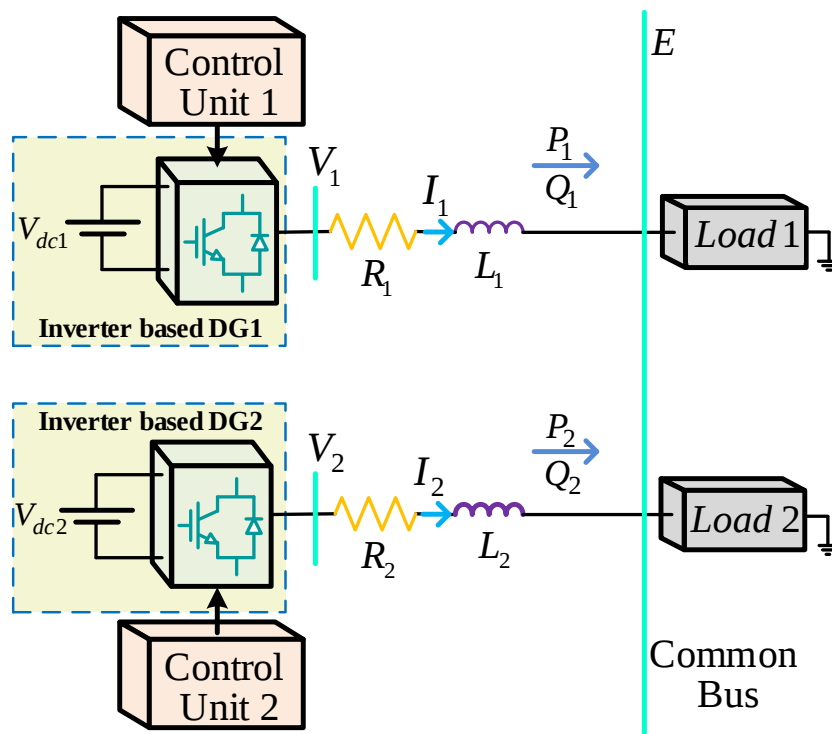
در ادامه این فصل، ابتدا طرح مشخصه افی پیشنهادی بر اساس شار مجازی با ارائه روابط ریاضی بیان می‌شود. سپس بخش‌های مختلف ساختار استراتژی کنترل ریزشبه تشریح می‌شود. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از شبیه‌سازی در نرم‌افزار Matlab/Simulink استفاده می‌شود.

۴-۲- استراتژی کنترل شار مجازی پیشنهادی

برای تشریح روش کنترل شار مجازی در ریزشبه‌های مقاومتی، شکل (۴-۲) در نظر گرفته شده است. بر اساس قانون KVL، رابطه ریاضی این شبکه به صورت زیر توصیف می‌شود.

$$V_i = R_i I_i + L_i \frac{dI_i}{dt} + E \quad (۴-۱)$$

که V_i بردار ولتاژ خروجی اینورتر، E بردار ولتاژ باس مشترک و I_i بردار جریان تزریقی هر منبع به باس مشترک است. بعلاوه، R_i و L_i به ترتیب مقاومت و اندوکتانس خطوط هستند. همچنین، شماره هر اینورتر با زیرنویس “i” مشخص می‌شود.



شکل (۴-۲): ساختار ریزشبه جزییره‌ای مقاومتی مورد مطالعه.

توان تحویلی هر اینورتر به باس مشترک با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} S_i &= P_i + jQ_i \\ &= E \times I_i^* \end{aligned} \quad (۲-۴)$$

که S_i توان مختلط، P_i توان اکتیو و Q_i توان راکتیو تحویلی هستند.

مشابه با تعریف شار در ماشین‌های الکتریکی، بردارهای شار مجازی به صورت انتگرال زمانی

بردارهای ولتاژ مربوطه تعریف می‌شوند:

$$\psi_i = \int V_i dt = |\psi_i| e^{j\varphi_i} \quad (۳-۴)$$

$$\psi_E = \int E dt = |\psi_E| e^{j\varphi_E} \quad (۴-۴)$$

که ψ_i و ψ_E به ترتیب بردارهای شار مجازی اینورتر "i" و باس مشترک هستند و دارای زوایای φ_i و

φ_E هستند. با توجه به روابط (۳-۴) و (۴-۴) اندازه و زاویه بردارهای شار مجازی را برحسب اندازه و

زاویه بردارهای ولتاژ به صورت روابط (۵-۴) و (۶-۴) می‌توان نوشت:

$$\varphi_i = \theta_i - \frac{\pi}{2}, \quad |\psi_i| = \frac{|V_i|}{\omega} \quad (۵-۴)$$

$$\varphi_E = \theta_E - \frac{\pi}{2}, \quad |\psi_E| = \frac{|E|}{\omega} \quad (۶-۴)$$

که θ_i و θ_E به ترتیب زوایای بردارهای ولتاژ V_i و E هستند. بعلاوه، ω فرکانس زاویه‌ای است.

با فرض مقاومتی بودن امپدانس خطوط و صرفنظر کردن از خاصیت اندوکتانسی آنها، جریان تزریقی

هر اینورتر را برحسب شارهای مجازی با استفاده از روابط (۱-۴)، (۳-۴) و (۴-۴) به صورت زیر می‌توان

بیان کرد:

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{1}{R_i} (V_i - E) \\ &= \frac{\omega}{R_i} \left(|\psi_i| e^{j(\varphi_i + \frac{\pi}{2})} - |\psi_E| e^{j(\varphi_E + \frac{\pi}{2})} \right) \end{aligned} \quad (۷-۴)$$

اکنون، توان مختلط تحویلی برحسب شارهای مجازی و با جایگذاری روابط (۴-۴) و (۷-۴) در رابطه (۲-۴)، به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$S_i = \frac{\omega}{R_i} \left(|\psi_i| e^{j(\varphi_i + \frac{\pi}{2})} - |\psi_E| e^{j(\varphi_E + \frac{\pi}{2})} \right)^* \omega |\psi_E| e^{j(\varphi_E + \frac{\pi}{2})} \quad (۸-۴)$$

با تجزیه رابطه (۸-۴) به بخش‌های حقیقی و موهومی، رابطه توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی هر اینورتر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_i = \frac{\omega^2}{R_i} \left(|\psi_E| |\psi_i| \cos(-\delta) - |\psi_E|^2 \right) \quad (۹-۴)$$

$$Q_i = \frac{\omega^2}{R_i} \left(|\psi_E| |\psi_i| \sin(-\delta) \right) \quad (۱۰-۴)$$

که δ اختلاف زاویه‌ای بین بردارهای ولتاژ اینورتر و باس مشترک و همچنین برابر با اختلاف زاویه‌ای بین بردارهای شار مجازی اینورتر و باس مشترک است. با توجه به اینکه δ معمولاً کوچک است [۵۰]، نتیجه می‌شود که:

$$\cos(\delta) \approx 1 \quad (۱۱-۴)$$

$$\sin(\delta) \approx \delta \quad (۱۲-۴)$$

با جایگذاری روابط (۱۱-۴) و (۱۲-۴) در روابط (۹-۴) و (۱۰-۴) نتیجه می‌شود:

$$P_i = \frac{\omega^2 |\psi_E|}{R_i} \left(|\psi_i| - |\psi_E| \right) \quad (۱۳-۴)$$

$$Q_i = -\frac{\omega^2}{R_i} |\psi_E| |\psi_i| \delta \quad (۱۴-۴)$$

روابط (۱۳-۴) و (۱۴-۴) نشان می‌دهند که توان اکتیو با اختلاف دامنه بین بردارهای شار مجازی اینورتر و شار مجازی باس مشترک یعنی $|\psi_i| - |\psi_E|$ متناسب است. به طور مشابه، توان راکتیو متناسب با اختلاف زاویه‌ای است. در نتیجه، روابط ریاضی مشخصه افتی شار مجازی برای ریزشکته‌های ولتاژ پایین به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\delta_i^{com} = \delta_i^n + k_{\delta i} (Q_i^n - Q_i) \quad (۱۵-۴)$$

$$|\psi_i^{com}| = |\psi_i^n| - k_{\psi i} (P_i^n - P_i) \quad (۱۶-۴)$$

که P_i^n توان اکتیو نامی، Q_i^n توان راکتیو نامی، $k_{\delta i}$ و $k_{\psi i}$ ضرایب مشخصه افی هستند. بعلاوه، δ_i^n اختلاف زاویه‌ای نامی و $|\psi_i^n|$ دامنه نامی امپدانس مجازی اینورتر هستند. همچنین، δ_i^{com} و $|\psi_i^{com}|$ به ترتیب مقادیر مرجع برای اختلاف زاویه‌ای و دامنه امپدانس مجازی اینورتر هستند.

۴-۳- استراتژی پیشنهادی کنترل ریز شبکه مبتنی بر کنترل مدل پیش‌بین

طرح کنترل مدل پیش‌بین به عنوان یک روش مدرن برای کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت به شمار می‌رود. ایده MPC ساده و قابل درک است. بعلاوه، امکان در نظر گرفتن محدودیت‌ها و ویژگی‌های غیر خطی سیستم را ممکن می‌کند. همچنین، رفتار مطلوب سیستم به صورت تابع هدفی که باید کمینه شود، فرمول‌بندی می‌شود [۵۱-۵۵]. در نتیجه، روش MPC در این فصل برای ارائه استراتژی کنترل ریز شبکه جزیره‌ای به کار می‌رود. ساختار استراتژی کنترل پیشنهادی ریز شبکه در شکل (۴-۳) آمده است که از چهار بخش تشکیل شده است:

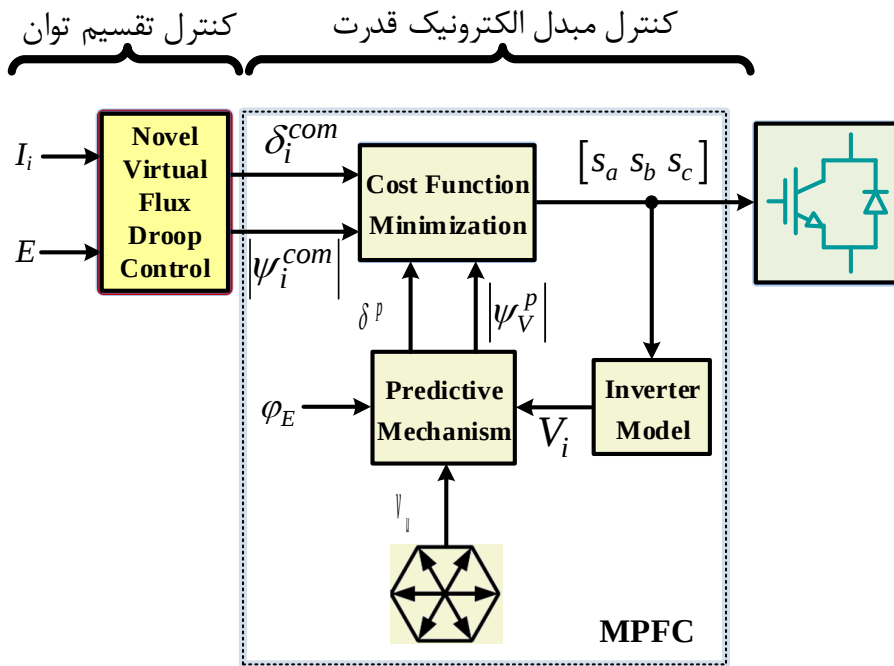
- کنترل تقسیم توان
- مدل اینورتر
- مکانیسم کنترل پیش‌بین
- کمینه‌سازی تابع هدف

در ادامه، عملکرد هر بخش توصیف می‌شود.

۴-۳-۱- کنترل تقسیم توان

همانطور که مطلوب است، توان مورد نیاز بارهای ریز شبکه باید متناسب با ظرفیت اینورترها تقسیم شود و در عین حال ولتاژ و فرکانس در محدوده مجاز حفظ شوند. در این فصل، روش کنترل مشخصه افی

شار مجازی جدیدی برای تقسیم توان بین واحدهای DG، پیشنهاد شد. همچنان که در بخش قبلی، توضیح داده شد، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی منابع به باس مشترک محاسبه می‌شوند و مقادیر مرجع برای دامنه شار مجازی اینورتر و اختلاف زاویه بین بردارهای شارهای مجازی اینورتر و باس مشترک بر اساس روابط (۴-۱۵) و (۴-۱۶) حاصل می‌شوند.



شکل (۴-۳): ساختار استراتژی کنترل ریز شبکه پیشنهادی.

۴-۳-۲- مدل اینورتر

با توجه به اینکه اینورترهای دو سطحی در این پژوهش به کار رفته‌اند، هشت حالت کلیدزنی مختلف وجود دارد که به صورت زیر نمایش داده می‌شوند:

$$s_u = [s_a \ s_b \ s_c] \quad u = 0, 1, \dots, 7 \quad (4-17)$$

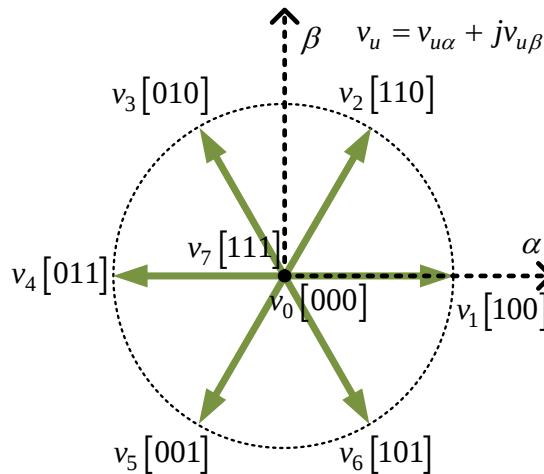
s_u بردار حالت کلیدزنی است. همچنین s_a ، s_b و s_c به ترتیب سیگنال‌های کلیدزنی فازهای a، b و c هستند. $s_j = 0$ ($j = a, b, c$) اگر کلید مربوطه باز باشد و $s_j = 1$ ($j = a, b, c$) اگر کلید مربوطه بسته باشد. بردار حالت کلیدزنی را در صفحه $\alpha - \beta$ به صورت رابطه زیر می‌توان بیان کرد:

$$s_u^{\alpha\beta} = \frac{2}{3} (s_a + \mathbf{a} s_b + \mathbf{a}^2 s_c) \quad (4-18)$$

$s_u^{\alpha\beta}$ بردار حالت کلیدزنی در صفحه $\alpha - \beta$ است و $\mathbf{a} = e^{j(2\pi/3)}$. بردارهای حالت کلیدزنی در شکل (۴-۴) نشان داده شده‌اند. همچنین بردارهای فضایی ولتاژ که در صفحه $\alpha - \beta$ تولید می‌شوند نیز در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. بردارهای فضایی از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} v_u &= V_{dc} \cdot s_u^{\alpha\beta} \\ &= v_{u\alpha} + jv_{u\beta} \end{aligned} \quad (۱۹-۴)$$

v_u بردار فضایی ولتاژ در صفحه $\alpha - \beta$ است. همچنین $v_{u\alpha}$ و $v_{u\beta}$ به ترتیب بخش‌های حقیقی و موهومی بردار فضایی ولتاژ هستند. علاوه، ولتاژ V_{dc} ورودی اینورتر است. شکل مختلط بردارهای فضایی ولتاژ در صفحه $\alpha - \beta$ در جدول (۱-۴) آمده است. لازم به ذکر است که $v_0 = v_7$ و در نتیجه فقط ۷ حالت مختلف برای بردارهای فضایی وجود خواهد داشت.



شکل (۴-۴): بردارهای فضایی ولتاژ و بردارهای کلیدزنی مربوطه در صفحه $\alpha - \beta$.

۴-۳-۳- مکانیسم کنترل پیش‌بین

مطابق شکل (۳-۴)، ولتاژ خروجی و شار مجازی اینورتر در لحظه نمونه‌برداری k^{th} در صفحه $\alpha - \beta$ با استفاده از روابط (۱۹-۴) و (۳-۴) به دست می‌آیند. دامنه شار مجازی اینورتر و اختلاف زاویه‌ای بین بردارهای شار مجازی اینورتر و باس مشترک، متغیرهایی هستند که باید پیش‌بینی شوند. مولفه‌های شار مجازی اینورتر در صفحه $\alpha - \beta$ یعنی $\psi_{V\alpha}$ و $\psi_{V\beta}$ با استفاده از رابطه (۴-۳) به صورت روابط (۲۰-۴) و (۲۱-۴) بیان می‌شوند:

$$\psi_{V\alpha}^{(k+1)} = \psi_{V\alpha}^{(k)} + T_s \cdot v_{u\alpha}^{(k)} \quad (۲۰-۴)$$

$$\psi_{V\beta}^{(k+1)} = \psi_{V\beta}^{(k)} + T_s \cdot v_{u\beta}^{(k)} \quad (۲۱-۴)$$

جدول (۱-۴): بردارهای کلیدزنی و بردارهای فضایی ولتاژ برای یک اینورتر دوسطحی سه فاز.

$s_a \ s_b \ s_c$	v_u
0 0 0	$v_0 = 0$
1 0 0	$v_1 = \frac{2}{3} V_{dc}$
1 1 0	$v_2 = (\frac{1}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3}) V_{dc}$
0 1 0	$v_3 = (-\frac{1}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3}) V_{dc}$
0 1 1	$v_4 = -\frac{2}{3} V_{dc}$
0 0 1	$v_5 = (-\frac{1}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3}) V_{dc}$
1 0 1	$v_6 = (\frac{1}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3}) V_{dc}$
1 1 1	$v_7 = 0$

که T_s دوره نمونه برداری است. سپس اندازه و زاویه فاز شار مجازی اینورتر در لحظه نمونه برداری بعدی

با روابط زیر محاسبه می شوند:

$$|\psi_V^p| = \sqrt{(\psi_{V\alpha}^{(k+1)})^2 + (\psi_{V\beta}^{(k+1)})^2} \quad (۲۲-۴)$$

$$\phi_V^{(k+1)} = \tan^{-1} \left(\frac{\psi_{V\beta}^{(k+1)}}{\psi_{V\alpha}^{(k+1)}} \right) \quad (۲۳-۴)$$

بالانویس "p" به متغیرهای پیش بینی شده اشاره دارد. لازم به ذکر است که زاویه فاز شار مجازی باس

مشترک با استفاده از یک مجموعه ولتاژ مجازی سه فاز تولید می شود و به صورت رابطه زیر در لحظه

نمونه برداری بعدی پیش بینی می شود:

$$\phi_E^{(k+1)} = \phi_E^{(k)} + \omega T_s \quad (۲۴-۴)$$

بنابراین، اختلاف زاویه‌ای بین بردارهای شار مجازی اینورتر و باس مشترک در لحظه نمونه‌برداری بعدی با رابطه زیر پیش‌بینی می‌شود:

$$\delta^P = \varphi_V^{(k+1)} - \varphi_E^{(k+1)} \quad (۲۵-۴)$$

۴-۳-۴- کمینه‌سازی تابع هدف

برای انتخاب بهترین بردار کلیدزنی، مقادیر پیش‌بینی شده $\left| \psi_V^P \right|$ و δ^P با یک تابع هدف برای تمامی هفت حالت مختلف کلیدزنی ارزیابی می‌شوند. در نتیجه، بردار حالتی که تابع هدف را کمینه می‌کند، انتخاب می‌شود و بردارهای کلیدزنی مربوطه در لحظه نمونه‌برداری بعدی به کلیدهای اینورتر اعمال خواهند شد. تابع هدف، رفتار مطلوب سیستم را به زبان ریاضی توصیف می‌کند. در این فصل، تابع هدف به صورتی تعریف می‌شود که دامنه شار مجازی اینورتر و اختلاف زاویه بین بردارهای شار مجازی اینورتر و باس مشترک به مقادیر مرجع خود نزدیک باشند. با در نظر گرفتن این نکته که مقادیر مرجع اشاره شده با استفاده از روابط (۱۵-۴) و (۱۶-۴) حاصل می‌شوند، تابع هدف با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$J_{\min} = k_1 \left| \left| \psi_V^{com} \right| - \left| \psi_V^P \right| \right| + k_2 \left| \delta^{com} - \delta^P \right| \quad (۲۶-۴)$$

k_1 و k_2 ضرایب‌های وزنی هستند. عبارت اول در تابع هدف باعث کاهش نوسانات شار مجازی و عبارت دوم باعث کاهش نوسانات اختلاف زاویه‌ای می‌شوند. انتخاب ضرایب وزنی با در نظر گرفتن اهمیت کاهش رپیل شار مجازی اینورتر و کاهش رپیل اختلاف زاویه‌ای انجام می‌شود.

۴-۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink بهره برده می‌شود و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از اعمال روش متداول مبتنی بر مشخصه افتی $P-V$ و $Q-\omega$ مقایسه می‌شوند. همچنین دو سناریو برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، فیلتر L-C در نزدیکی واحد DG قرار دارد و در سناریوی دوم فیلتر L-C در نزدیکی بار تعبیه شده

است. پارامترهای سلف و خازن فیلتر به صورتی انتخاب می‌شوند که با تضعیف موثر هارمونیک‌ها در روش پیشنهادی، شاخص‌های THD را در محدوده مجاز حفظ کنند.

سناریو اول: استفاده از فیلتر L-C در نزدیکی واحد DG

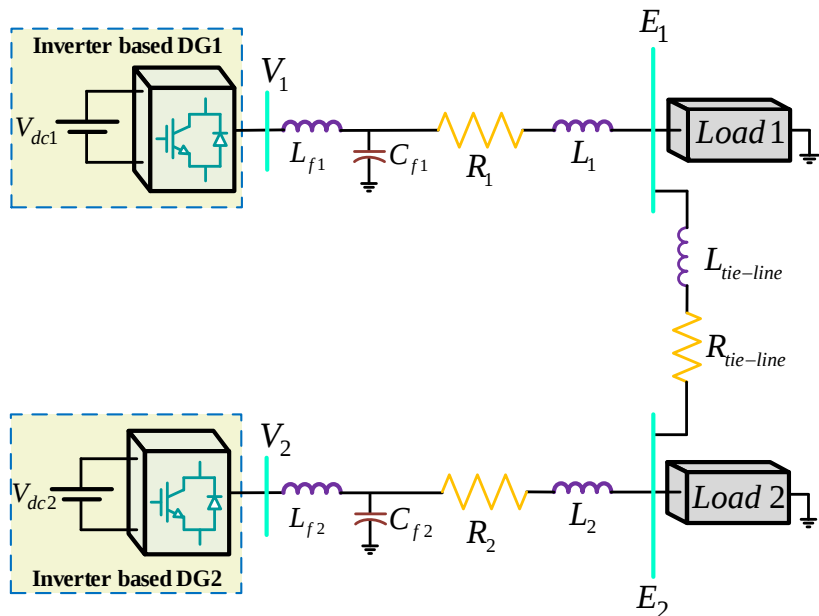
یک ریزشبه‌جریه‌ای مشابه شکل (۴-۵) در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی می‌شود. پارامترهای فیلتر برای هر دو واحد، یکسان در نظر گرفته شده است. مشخصات ریزشبه‌جریه و سیستم کنترل در جدول (۴-۲) آمده است. بار به صورت پله‌ای در لحظه $t=2s$ کاهش می‌یابد و در لحظه $t=4s$ به مقدار اولیه افزایش می‌یابد.

جدول (۴-۲): اندازه متغیرهای ریزشبه‌جریه و کنترل در سناریو اول.

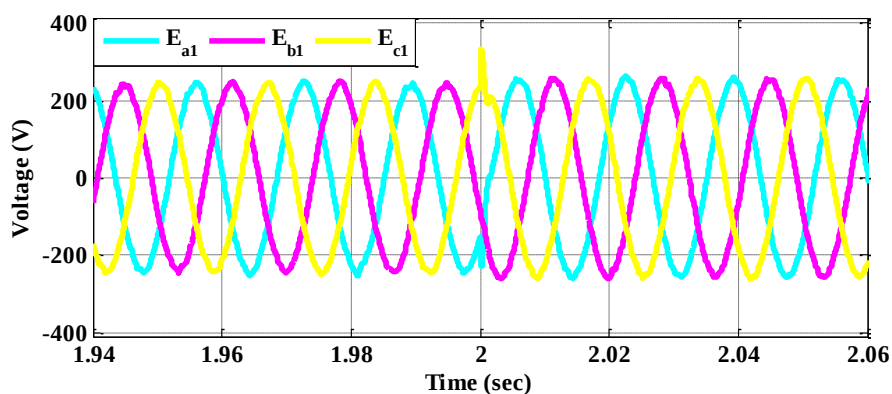
پارامتر	مقدار
مقاومت خط	3Ω
اندوکتانس خط	1 mH
مقاومت خط اتصال	3Ω
اندوکتانس خط اتصال	4.8 mH
خازن فیلتر	100 μF
اندوکتانس فیلتر	4 mH
ولتاژ نامی خط	300 V
فرکانس نامی	60 Hz
ولتاژ مستقیم خروجی DG	600 V
توان اکتیو نامی DG1	10 kW
توان راکتیو نامی DG1	4 kVAr
توان اکتیو نامی DG2	8.5 kW
توان راکتیو نامی DG2	3 kVAr
شیب مشخصه افقی $P - \psi $ برای DG1	$-2.67 \times 10^{-5} \text{ Wb/W}$
شیب مشخصه افقی $Q - \delta$ برای DG1	$1.15 \times 10^{-4} \text{ Rad/VAr}$

شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) به ترتیب ولتاژ سه فاز طرف بار را برای باس E1 نشان می‌دهند. همچنین دامنه ولتاژ باس E1 در تمام مدت شبیه‌سازی بر حسب پریونیت در شکل (۴-۸) آمده است. همانطور که دیده می‌شود، با وجود تغییرات بار در باز زمانی $t=2s$ تا $t=4s$ ، ولتاژ بار در هر دو روش در محدوده

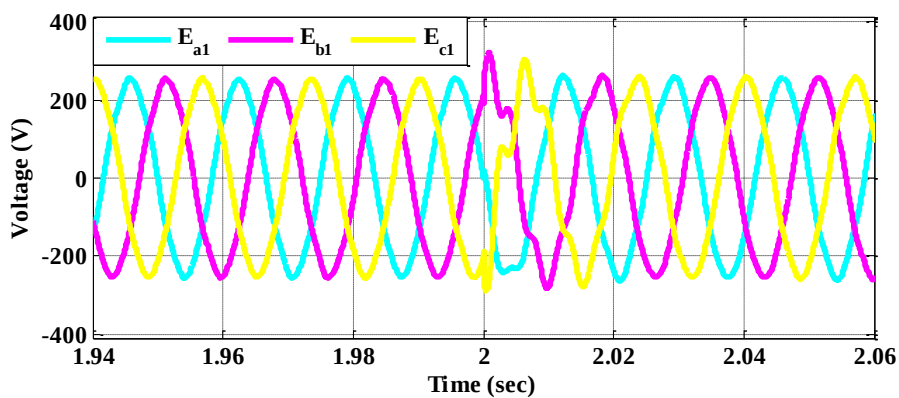
مجاز قرار دارد، اگرچه، رپل ولتاژ در روش پیشنهادی با توجه به شکل (۴-۸) بهتر است و انحرافات ولتاژ نیز نسبت به روش متداول کمتر است.



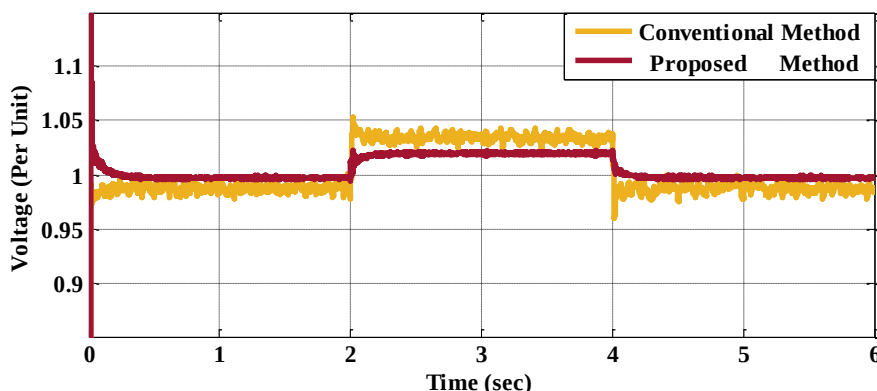
شکل (۴-۵): دیاگرام شماتیک ریزشبه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو اول.



شکل (۴-۶): منحنی ولتاژ سمت بار بر اساس روش کنترل متداول در ریزشبه مقاومتی در سناریو اول.

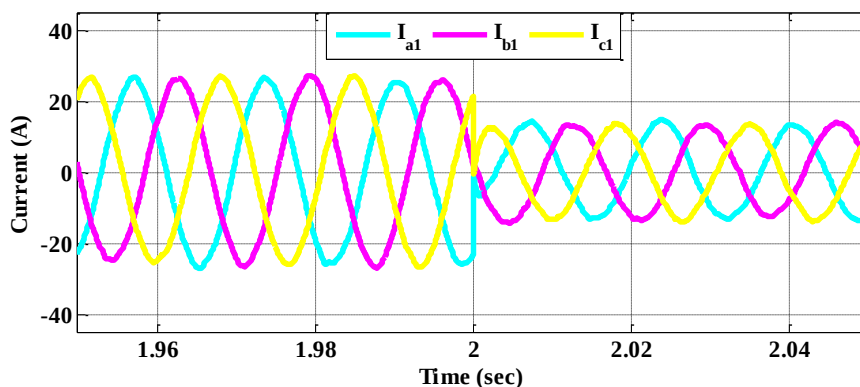


شکل (۴-۷): منحنی ولتاژ سمت بار بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در ریزشبه مقاومتی در سناریو اول

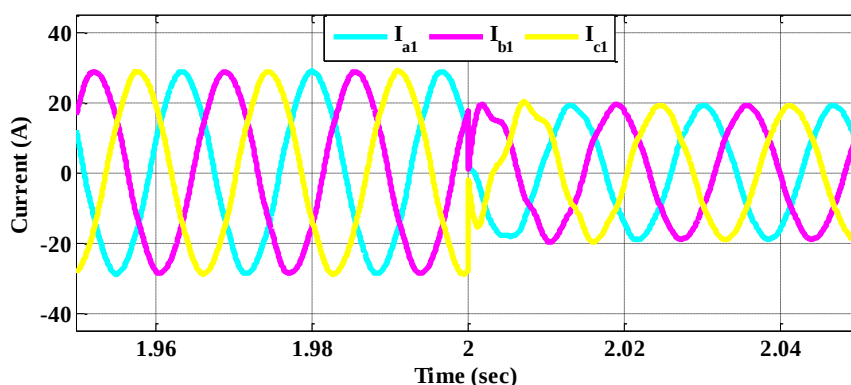


شکل (۴-۸): مقایسه ولتاژ خط برای روش متداول و استراتژی پیشنهادی برای ریز شبکه مقاومتی در سناریو اول

شکل های (۴-۹) و (۴-۱۰) به ترتیب منحنی جریان های سه فاز تزریقی واحد DG1 به ریز شبکه را نشان می دهند. همانطور که دیده می شود با کاهش بار در لحظه $t=2s$ ، دامنه جریان های تزریقی کاهش می یابد، اما شکل موج جریان های تزریقی در روش پیشنهادی نسبت به روش متداول در حالت دائمی، کیفیت بهتری دارد.

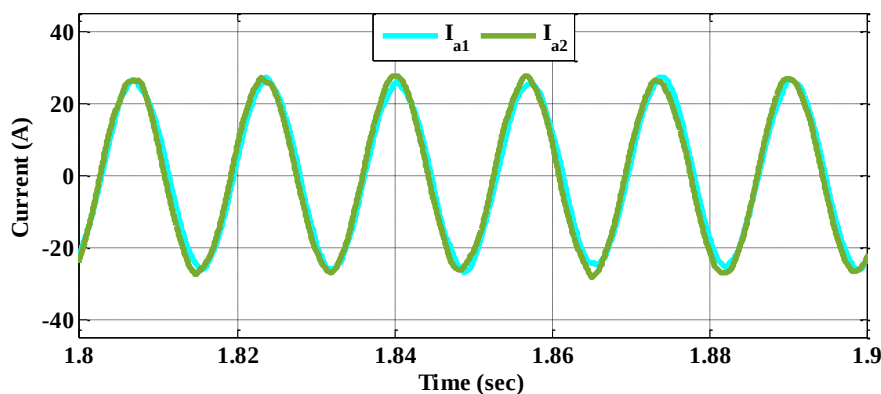


شکل (۴-۹): منحنی جریان تزریقی DG1 به ریز شبکه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو اول.

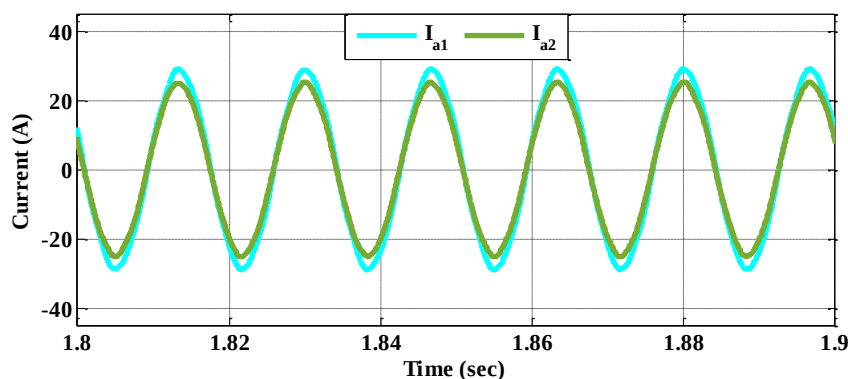


شکل (۴-۱۰): منحنی جریان تزریقی DG1 به ریز شبکه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو اول.

شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) جریان‌های تزریقی هر دو واحد DG به ریزشبه بر اساس روش متداول و روش پیشنهادی نشان می‌دهند. با توجه به اینکه، هر دو روش کنترل ولتاژ نسبتاً مناسبی دارند، تقسیم جریان بین واحدهای DG باید متناسب با ظرفیت آنها انجام شود. اما در روش متداول، جریان‌های تزریقی واحدهای DG در حالت دائمی تقریباً برابر هستند، در صورتی که ظرفیت نامی واحدهای DG با یکدیگر برابر نیستند. برخلاف روش متداول، در روش پیشنهادی، تقسیم توان متناسب با ظرفیت واحدهای DG انجام شده است. بنابراین عملکرد مناسب روش پیشنهادی در کنترل جریان، تایید می‌شود.



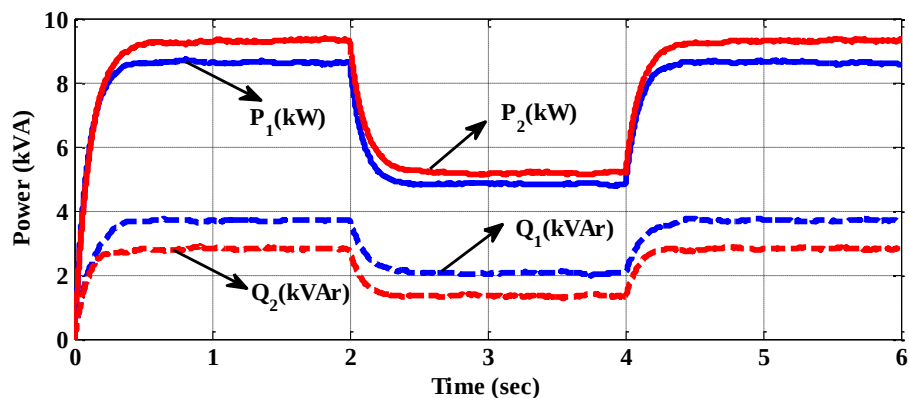
شکل (۴-۱۱): جریان‌های تزریقی فاز a به ریزشبه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو اول.



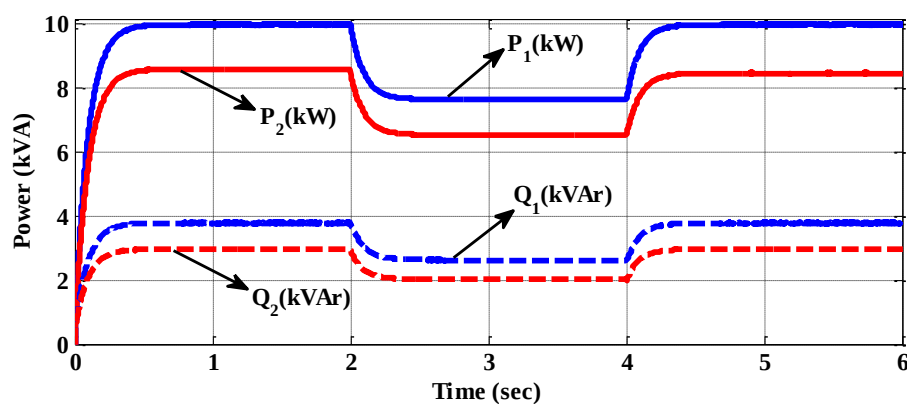
شکل (۴-۱۲): جریان‌های تزریقی فاز a به ریزشبه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو اول.

شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) توان‌های تزریقی واحدهای DG به ریزشبه را به ترتیب برای روش متداول و روش پیشنهادی، نشان می‌دهند. همانطور دیده می‌شود، خطای تقسیم توان راکتیو در روش

پیشنهادی قابل توجه است و واحدهای DG متناسب با ظرفیت نامی خود در تغذیه توان بارهای ریز شبکه مشارکت نمی کنند. در حالی که در روش پیشنهادی، تقسیم توان های اکتیو و راکتیو بین واحدهای DG متناسب با ظرفیت آنها انجام می شود. بنابراین عملکرد مناسب روش پیشنهادی در تقسیم توان، تایید می شود.

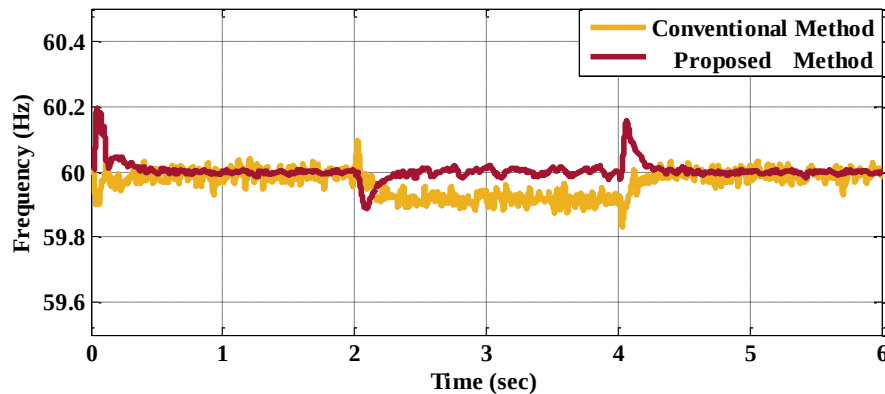


شکل (۴-۱۳): توان های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریز شبکه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو اول.



شکل (۴-۱۴): توان های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریز شبکه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو اول.

شکل (۴-۱۵) فرکانس ریز شبکه برای روش متداول و روش پیشنهادی را نشان می دهد. اگرچه انحرافات فرکانس در هر دو روش در محدوده مجاز قرار دارد؛ اما بر اساس روش متداول، انحرافات فرکانس در بازه زمانی $t=2s$ تا $t=4s$ قابل توجه است، در صورتی که در روش پیشنهادی، کنترل فرکانس در تمام مدت شبیه سازی به خوبی انجام می شود. در نتیجه عملکرد مناسب روش پیشنهادی در کنترل فرکانس تایید می شود.

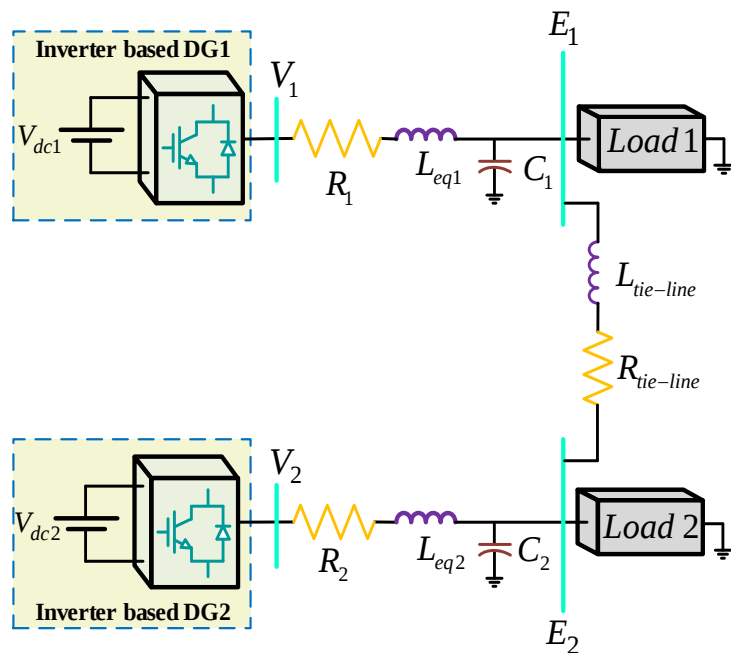


شکل (۴-۱۵): مقایسه فرکانس ریز شبکه مقاومتی در سناریو اول.

سناریو دوم: استفاده از فیلتر L-C در نزدیکی بار

کارایی استراتژی کنترل پیشنهادی با مطالعات شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink ارزیابی می‌شود. در این راستا، یک ریز شبکه جزیره‌ای با امپدانس خطوط مقاومتی، مشابه شکل (۴-۱۶) شبیه‌سازی می‌شود. پارامترهای کنترل و ریز شبکه در جدول (۴-۳) آمده است. عملکرد استراتژی کنترل پیشنهادی با روش مشخصه افقی مبتنی بر $P-V$ و $Q-\omega$ مقایسه می‌شود. توان مورد نیاز بارهای ریز شبکه در لحظه $t=2s$ به طور پله‌ای کاهش می‌یابد و سپس در لحظه $t=4s$ به مقدار اولیه خود برمی‌گردد. نتایج عددی حاصل از مقایسه دو روش اشاره شده در جدول (۴-۴) آمده است.

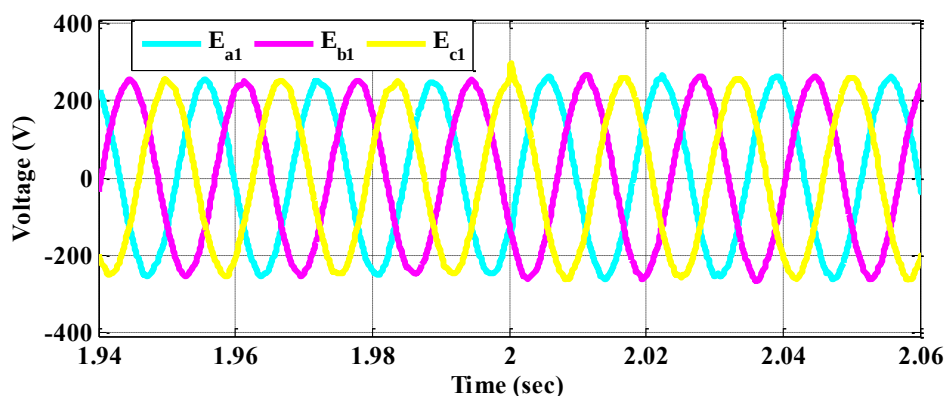
منحنی ولتاژ سمت بار برای روش متداول و استراتژی پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) آمده است. همچنین، مقادیر پریونیت ولتاژ برای روش متداول و استراتژی پیشنهادی در شکل (۴-۱۹) با یکدیگر مقایسه شده است. با وجود اینکه شکل موج‌های ولتاژ برای هر دو روش، متعادل و سینوسی هستند، با توجه به جدول (۴-۴)، دامنه انحرافات ولتاژ برای استراتژی پیشنهادی به طور چشمگیری نسبت به روش متداول کمتر است که این امر در بهبود شاخص THD ولتاژ نیز موثر است. بعلاوه، کاهش بار در لحظه $t=2s$ به طور معمول باعث افزایش مقدار پریونیت ولتاژ می‌شود. در این شرایط، روش متداول نمی‌تواند دامنه ولتاژ را در محدوده مجاز حفظ کند. در حالی که، استراتژی پیشنهادی دامنه ولتاژ را در محدوده مجاز حفظ می‌کند. بنابراین، کارایی روش پیشنهادی در کنترل ولتاژ تایید می‌شود.



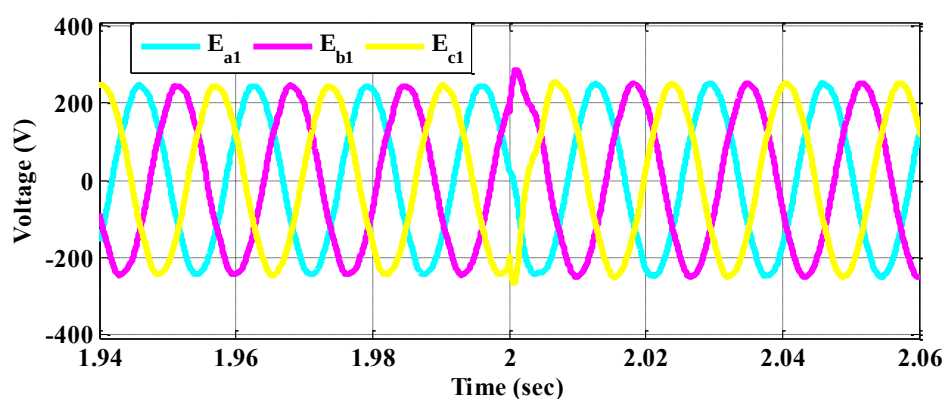
شکل (۴-۱۶): دیاگرام شماتیک ریزشبه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو دوم.

جدول (۴-۳): اندازه متغیرهای ریزشبه و کنترل در سناریو دوم.

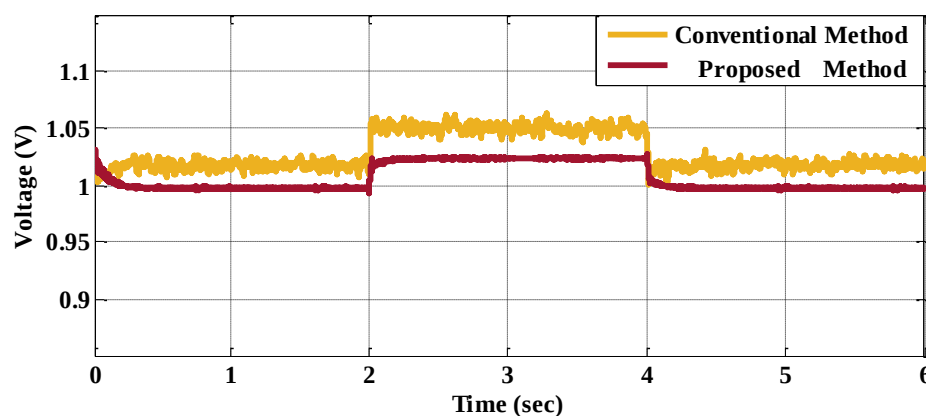
پارامتر	مقدار
مقاومت خط	3Ω
اندوکتانس خط	1 mH
مقاومت خط اتصال	3Ω
اندوکتانس خط اتصال	4.8 mH
خازن فیلتر	100 μ F
اندوکتانس فیلتر	3 mH
ولتاژ نامی خط	300 V
فرکانس نامی	60 Hz
ولتاژ مستقیم خروجی DG	600 V
توان اکتیو نامی DG1	9.6 kW
توان راکتیو نامی DG1	3.9 kVAr
توان اکتیو نامی DG2	8.4 kW
توان راکتیو نامی DG2	3 kVAr
شیب مشخصه افتی $P - \psi $ برای DG1	-2.67×10^{-5} Wb/W
شیب مشخصه افتی $Q - \delta$ برای DG1	1.15×10^{-4} Rad/VAr
شیب مشخصه افتی $P - \psi $ برای DG2	-1.54×10^{-5} Wb/W
شیب مشخصه افتی $Q - \delta$ برای DG2	-1.55×10^{-4} Rad/VAr



شکل (۴-۱۷): منحنی ولتاژ سمت بار بر اساس روش کنترل متداول در ریز شبکه مقاومتی در سناریو دوم.



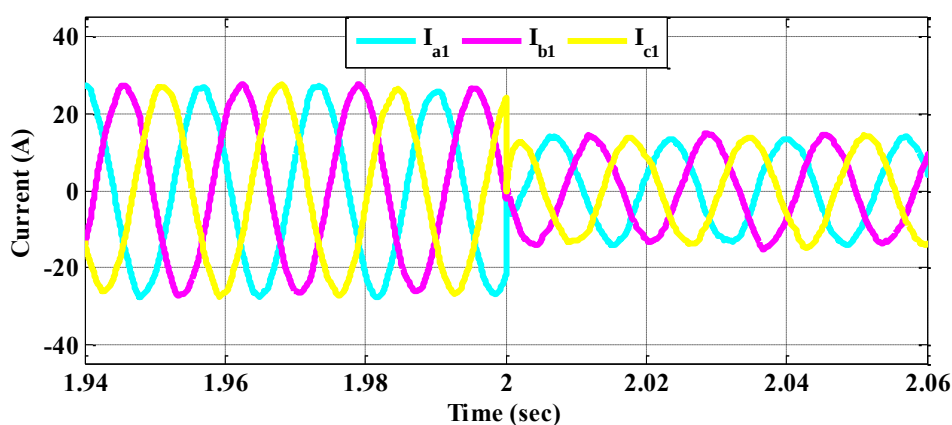
شکل (۴-۱۸): منحنی ولتاژ سمت بار بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در ریز شبکه مقاومتی در سناریو دوم.



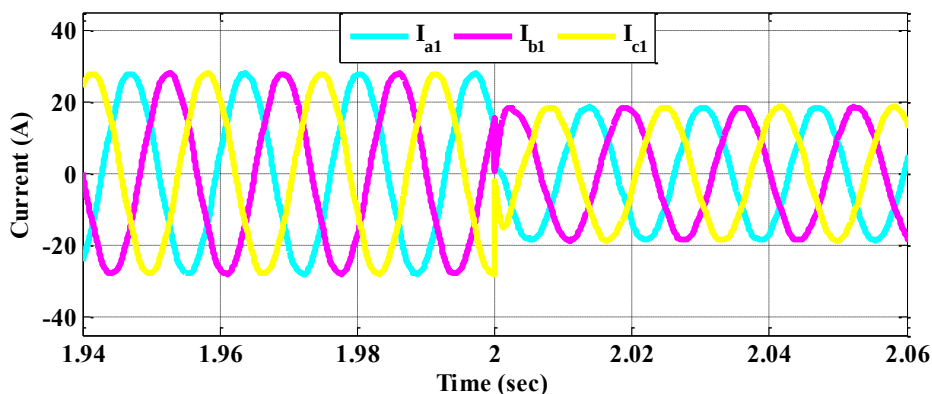
شکل (۴-۱۹): مقایسه ولتاژ خط برای روش متداول و استراتژی پیشنهادی در ریز شبکه مقاومتی در سناریو دوم.

شکل‌های (۴-۲۰) و (۴-۲۱)، منحنی‌های جریان را برای روش متداول و استراتژی پیشنهادی نشان می‌دهند. بعلاوه جریان‌های تزریقی فاز a برای دو DG در روش متداول و استراتژی پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۴-۲۲) و (۴-۲۳) مقایسه شده است. همانطور که دیده می‌شود، تقاضای بار در روش

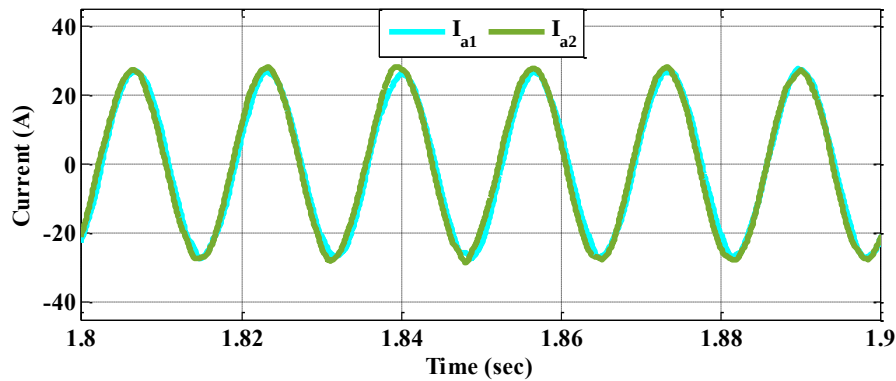
متداول، به طور نادرستی بین واحدهای تولید پراکند تقسیم شده است؛ به دلیل اینکه با وجود متفاوت بودن ظرفیت نامی واحدهای DG، جریان‌های تزریقی آنها تقریباً برابر است و این نکته نشان می‌دهد که جریان‌های تزریقی متناسب با ظرفیت آنها نیست. کارایی روش متداول وابستگی زیادی به کیفیت عملکرد حلقه کنترل داخلی جریان دارد که از کنترل‌کننده PI بهره می‌برد. در صورتی که در روش پیشنهادی، علاوه بر حذف حلقه کنترل داخلی جریان نیازی به کنترل‌کننده‌های PI نیست و بهترین بردار کلیدزنی با استفاده از طرح کنترل مدل پیش‌بین شار مجازی انتخاب می‌شود. بنابراین، عملکرد استراتژی پیشنهادی در شرایط مختلف بار، بهبود پیدا می‌کند که این مسئله باعث بهبود شاخص THD جریان نسبت به روش متداول می‌شود.



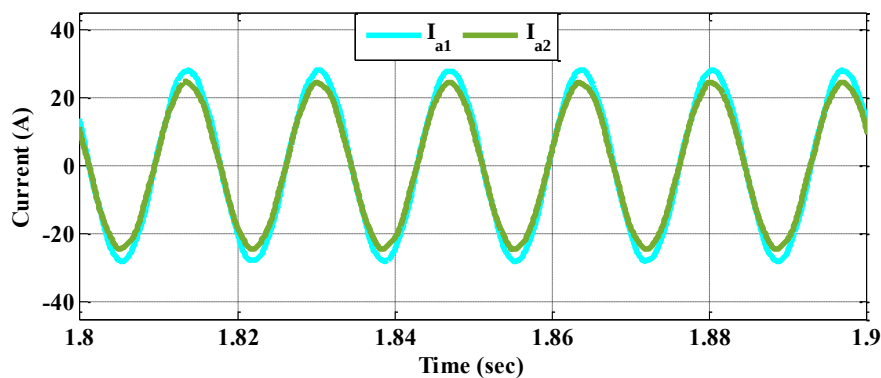
شکل (۴-۲۰): منحنی جریان تزریقی DG1 به ریزش شبکه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو دوم.



شکل (۴-۲۱): منحنی جریان تزریقی DG1 به ریزش شبکه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو دوم.



شکل (۴-۲۲): جریان‌های تزریقی فاز a به ریزشبه مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو دوم.



شکل (۴-۲۳): جریان‌های تزریقی فاز a به ریزشبه مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو دوم.

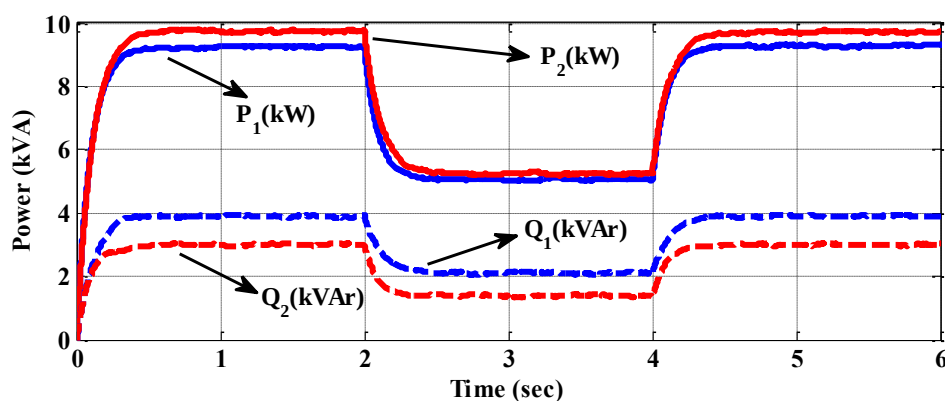
توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی هر دو DG بر اساس روش متداول و استراتژی کنترل پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۵) آمده است. بعلاوه، برای مقایسه نتایج، خطاهای توان اکتیو و راکتیو در شرایط نامی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$e_P = \left(\left(\sum_{i=1}^N \frac{P_i^{rated} - P_i^{actual}}{P_i^{rated}} \right) / \sum_{i=1}^N i \right) \times 100 \quad (۴-۲۷)$$

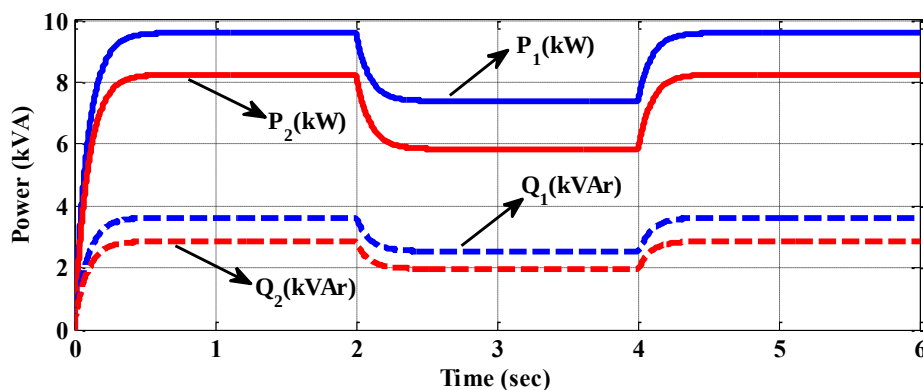
$$e_Q = \left(\left(\sum_{i=1}^N \frac{Q_i^{rated} - Q_i^{actual}}{Q_i^{rated}} \right) / \sum_{i=1}^N i \right) \times 100 \quad (۴-۲۸)$$

که e_P و e_Q به ترتیب خطاهای توان اکتیو و راکتیو هستند. بعلاوه P_i^{actual} و Q_i^{actual} به ترتیب مقادیر واقعی توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدشده هستند. همچنین، P_i^{rated} و Q_i^{rated} مقادیر نامی توان‌های اکتیو و راکتیو برای منبع “i” هستند. N نیز تعداد کل منابع را نشان می‌دهد که در این فصل برابر با ۲ است.

با استفاده از روش متداول، توان مورد نیاز بار به صورت نادرست بین واحدهای DG تقسیم می‌شود؛ به بیان دیگر، تقسیم توان هر منبع متناسب با ظرفیت آن نخواهد بود که این مسئله عملکرد ضعیف روش مشخصه افی متداول را نشان می‌دهد. با این وجود، استراتژی کنترل پیشنهادی در این فصل با دقت بالایی تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو مورد نیاز بار را بین واحدهای DG انجام می‌دهد؛ به طوری که هر منبع، متناسب با ظرفیت نامی خود در تولید توان و پاسخ به تقاضای بار مشارکت می‌کند. در نتیجه، خطاهای توان (به ویژه خطای توان اکتیو) در استراتژی کنترل پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش متداول کاهش می‌یابد که این مسئله در جدول (۴-۴) نیز مشاهده می‌شود.



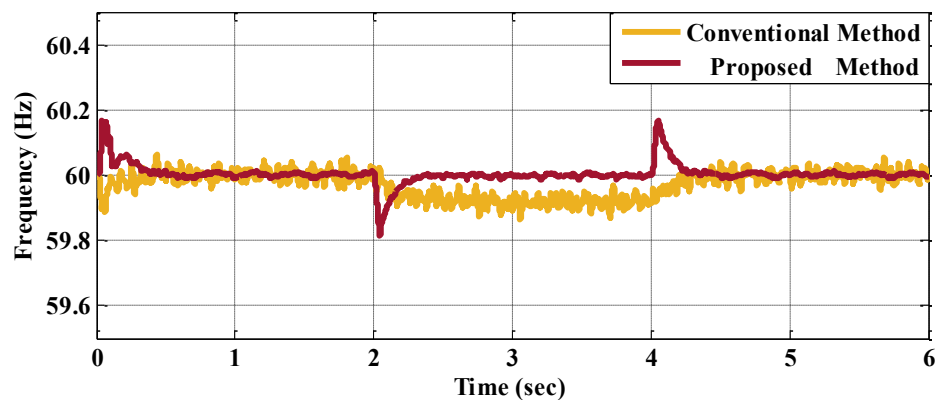
شکل (۴-۲۴): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبكة مقاومتی بر اساس روش کنترل متداول در سناریو دوم.



شکل (۴-۲۵): توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی به ریزشبكة مقاومتی بر اساس استراتژی کنترل پیشنهادی در سناریو دوم.

شکل (۴-۲۶)، مقایسه بین روش متداول و استراتژی پیشنهادی را در کنترل فرکانس نشان می‌دهد. عملکرد ضعیف روش متداول در کنترل فرکانس بر اساس مشخصه افی $Q-\omega$ مشهود می‌باشد که

انحراف فرکانس را در پی خواهد داشت. با این حال، در استراتژی پیشنهادی، اختلاف زاویه بین بردارهای شار مجازی اینورتر و باس مشترک با دقت بالایی کنترل می‌شود و هر دو بردارهای شار مجازی با سرعت زاویه‌ای ثابتی خواهند چرخید. در نتیجه، صرف‌نظر از اینکه δ چقدر تغییر می‌کند، فرکانس زاویه‌ای بردار شار مجازی باس مشترک، ثابت باقی خواهد ماند. بنابراین، عملکرد بهتر استراتژی پیشنهادی در کنترل فرکانس نسبت به روش متداول ثابت می‌شود.



شکل (۴-۲۶): مقایسه فرکانس ریزشبه مقاومتی در سناریو دوم.

جدول (۴-۴): مقایسه نتایج در شرایط نامی برای سناریو دوم.

روش	dV	df	e_p	e_Q	THD_V	THD_I
روش متداول	2.5%	0.05Hz	21.3%	2.6%	1.95%	2.60%
روش پیشنهادی	0.4%	0.01Hz	0.5%	2.5%	1.19%	1.70%

* dV و df به ترتیب انحرافات ولتاژ و فرکانس هستند.

* e_p و e_Q به ترتیب خطاهای توان اکتیو و راکتیو هستند.

* THD_V و THD_I به ترتیب شاخص THD ولتاژ و جریان هستند.

۴-۵- جمع‌بندی

روش کنترل تقسیم توان در ریزشبه‌های ولتاژ پایین به طور متداول مبتنی بر مشخصه افتی $P-V$ و $Q-\omega$ است. اما این روش کنترلی دارای معایبی نظیر عملکرد نامناسب در تقسیم توان اکتیو، انحرافات ولتاژ و فرکانس است. در این فصل، یک استراتژی جدید برای کنترل توان مبتنی بر روابط مشخصه افتی $P-|\psi|$ و $Q-\delta$ در ریزشبه پیشنهاد شد که می‌تواند مشکلات اشاره شده را برطرف کند. با مقاومتی

در نظر گرفتن امپدانس خطوط در ریزشبه‌های ولتاژ پایین یک طرح کنترلی جدید مبتنی بر شار مجازی برای تقسیم توان ارائه شد. همچنین برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی از طرح کنترل مدل پیش‌بین شار مجازی اینورتر استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از مقایسه با روش متداول به کمک شبیه‌سازی در محیط نرم افزار Matlab/Simulink بهره برده شد. با تحلیل نتایج، تایید شد که استراتژی پیشنهادی با دقت بالایی تقسیم توان بین واحدهای DG را متناسب با ظرفیت منابع کنترل می‌کند و در عین حال به طور قابل توجهی انحرافات ولتاژ و فرکانس را کاهش می‌دهد.

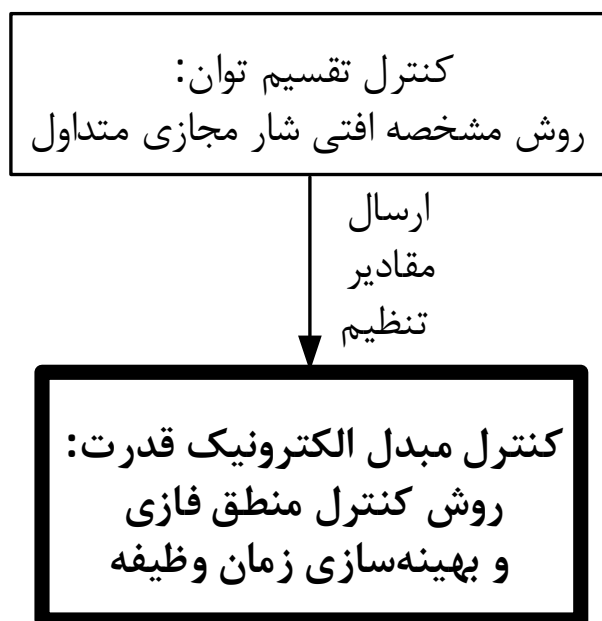
لازم به ذکر است که در تکنیک کنترل مدل پیش‌بین یا کنترل مستقیم شار مجازی، به دلیل محدود بودن تعداد بردارهای کلیدزنی و همچنین اعمال تنها یک بردار کلیدزنی در هر دوره کنترل، تغییرات مطلوب در خروجی حاصل نمی‌شود. به همین منظور در فصل بعدی، با اصلاح بخش کنترل مبدل الکترونیک قدرت، برای انتخاب بردار کلیدزنی از منطق فازی بهره برده می‌شود. همچنین با بهینه‌سازی زمان وظیفه، در هر دوره کنترل دو بردار کلیدزنی به اینورتر اعمال می‌شود که این امر، بهبود کارایی سیستم کنترل را در پی دارد.

فصل پنجم:

**اصلاح روش کنترل مستقیم شار
برای بهبود تقسیم توان**

۵-۱- مقدمه

استراتژی کنترل توان در ریزشبه‌های جزیره‌ای که امیدانس خطوط در آنها به صورت اندوکتیو هستند، به طور متداول مبتنی بر مشخصه افقی $P-\omega$ و $Q-V$ است. با این وجود، این طرح کنترلی دارای معایبی نظیر ساختار کنترلی پیچیده، انحرافات ولتاژ و فرکانس و همچنین عملکرد نادرست در تقسیم توان است [۳۵] و [۵۶-۵۷]. برای غلبه بر مشکلات اشاره شده از تکنیک مشخصه افقی شار مجازی بهره برده می‌شود. در این روش، با حذف حلقه خارجی کنترل ولتاژ و حلقه داخلی کنترل جریان، ساختار کنترلی ساده‌ای حاصل می‌شود. با این وجود، این روش کنترلی، دارای معایبی نیز می‌باشد که ناشی از وجود تنظیم‌کننده‌های هیستریزیس است که می‌تواند نوسانات ولتاژ و جریان را در پی داشته باشد و در نتیجه کیفیت توان تحویلی به ریزشبه را تحت تاثیر قرار دهد. در این راستا، در این فصل، راهکاری برای کنترل مبدل الکترونیک قدرت ارائه می‌شود. شکل (۵-۱) ساختار استراتژی کنترل ریزشبه ارائه شده در این فصل را نشان می‌دهد که کارهای انجام شده در این فصل با قسمت پر رنگ نشان داده شده است.



شکل (۵-۱): ساختار ارائه شده در فصل پنجم.

در این فصل، ابتدا طرح کنترل متداول ریزشبه مبتنی بر مشخصه افتی با استفاده از تکنیک کنترل مستقیم شار مجازی تشریح می‌شود. به دلیل محدود بودن بردارهای کلیدزنی برای اینورتر دو سطحی، انتخاب بردار با استفاده از جدول کلیدزنی، نمی‌تواند تغییرات مطلوب را فراهم کند، به همین دلیل، در بخش دوم، با بهره بردن از منطق فازی، طرح کنترل مستقیم فازی شار مجازی ارائه می‌شود. کنترل مبتنی بر منطق فازی به عنوان یک راهکار موثر برای فرآیندهای پیچیده که مدل ریاضی آن در دسترس نیست یا غیرخطی است، به شمار می‌رود. با توجه به اینکه طرح کنترل توان مبتنی بر مشخصه افتی، یک روش غیرخطی به حساب می‌آید، ترکیب آن با کنترل مبتنی بر منطق فازی برای غلبه بر مشکلات روش متداول مشخصه افتی، پیشنهاد می‌شود. بعلاوه، به دلیل اینکه در روش متداول کنترل توان، در هر بازه کنترلی تنها یک بردار کلیدزنی اعمال می‌شود، ممکن است که ولتاژ مطلوب در خروجی اینورتر تولید نشود. به منظور ارزیابی طرح‌های پیشنهادی، از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink بهره برده می‌شود و نتایج به دست آمده در بخش‌های دوم و سوم با روش متداول کنترل توان در ریزشبه جزیره‌ای مبتنی بر کنترل مستقیم شار مجازی مقایسه می‌شوند.

۵-۲- روش متداول کنترل توان مبتنی بر شار مجازی در ریزشبه جزیره‌ای

در یک ریزشبه جزیره‌ای با آرایش موازی شامل واحدهای DG، مشابه شکل (۵-۲)، هر DG با استفاده از اینورتر به ریزشبه متصل می‌شود. استراتژی کنترل ریزشبه مبتنی بر طرح کنترل متداول شار مجازی در شکل (۵-۳) نشان داده شده است. این طرح کنترلی از دو بخش تقسیم توان و تولید سیگنال‌های کلیدزنی تشکیل شده است که در ادامه عملکرد هر بخش تشریح می‌شود.

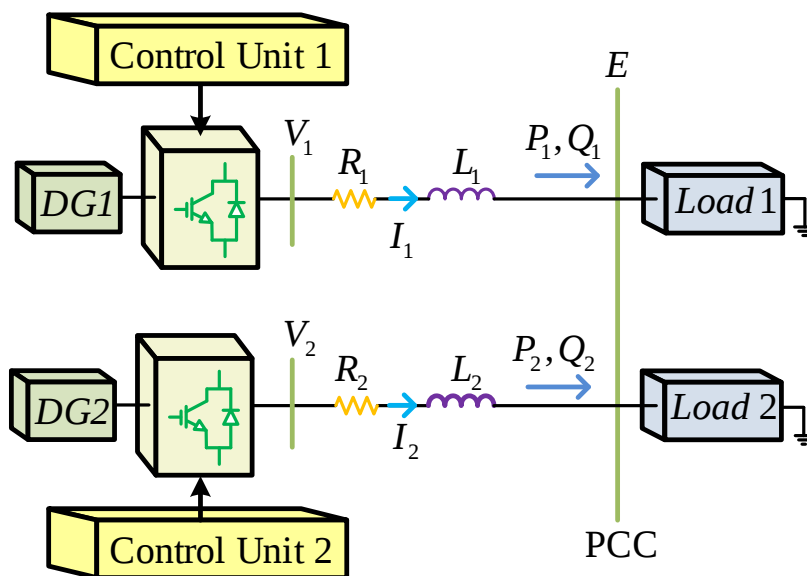
۵-۲-۱- بخش اول: تقسیم توان

در بخش اول، مقادیر مرجع شار و زاویه به منظور تقسیم متناسب توان با استفاده از روش VFD تعیین می‌شوند. روابط ریاضی مشخصه افتی شار مجازی به صورت زیر توصیف می‌شوند:

$$\delta_i^{com} = \delta_i^n - k_{\delta_i} (P_i^n - P_i) \quad (1-5)$$

$$|\psi_i^{com}| = |\psi_i^n| - k_{\psi_i} (Q_i^n - Q_i) \quad (2-5)$$

که δ_i^n مقدار نامی اختلاف فاز بین بردارهای شار مجازی اینورتر و PCC و $|\psi_i^n|$ مقدار نامی دامنه شار مجازی اینورتر را نشان می‌دهند. k_{ψ_i} و k_{δ_i} ضرایب مشخصه‌افتی هستند. P_i^n و Q_i^n به ترتیب مقادیر نامی توان اکتیو و توان راکتیو هستند. P_i و Q_i نیز به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به ریزشبه هستند. بدین ترتیب با استفاده از روابط (1-5) و (2-5) مقادیر مرجع برای اختلاف زاویه‌ای و دامنه شار مجازی اینورتر یعنی δ_i^{com} و $|\psi_i^{com}|$ محاسبه می‌شوند.

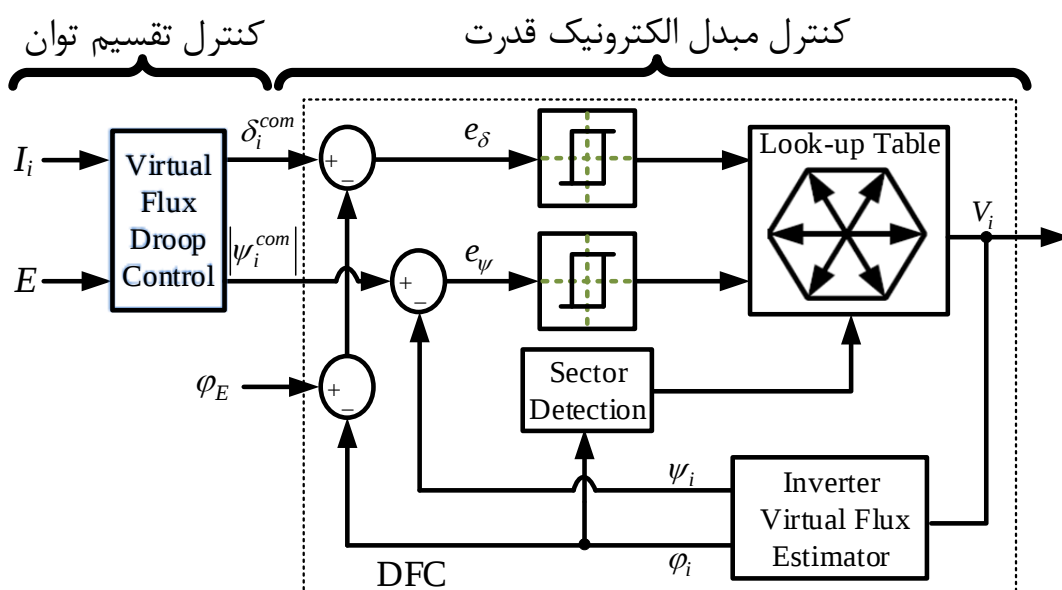


شکل (2-5): یک ریزشبه جزیره‌ای با اینورترهای موازی.

۵-۲-۲- بخش دوم: کنترل مبدل الکترونیک قدرت

در بخش دوم به منظور اعمال مقادیر مرجع به دست آمده از بخش اول، از روش کنترل مستقیم شار بهره برده می‌شود. بر اساس روش DFC، مشابه روش کنترل مستقیم توان و کنترل مستقیم گشتاور، دو متغیر اختلاف زاویه‌ای بین بردارهای شار مجازی اینورتر و باس مشترک و همچنین دامنه شار مجازی اینورتر یعنی δ_i و $|\psi_i|$ به طور مستقیم با انتخاب بردارهای کلیدزنی مناسب کنترل می‌شوند. به همین

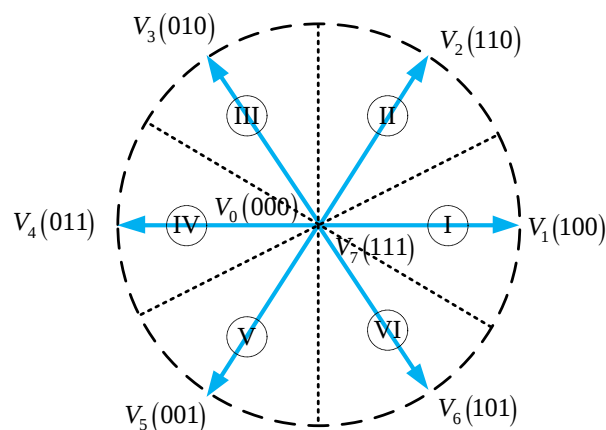
منظور، ابتدا با استفاده از وضعیت کنونی کلیدهای اینورتر، ولتاژ خروجی اینورتر تخمین زده می‌شود و سپس بردار شار مجازی اینورتر در وضعیت کنونی محاسبه می‌شود. اندازه بردار تخمینی برای شار مجازی اینورتر از مقدار مرجع شار مجازی کم می‌شود و خطای اندازه شار مجازی تولید می‌شود. همچنین، با استفاده از یک مجموعه ولتاژ سه‌فاز AC زاویه بردار شار مجازی PCC به صورت مجازی ساخته می‌شود و از زاویه بردار شار مجازی تخمینی کم می‌شود. حاصل این تفاضل از زاویه مرجع به دست آمده از VFD کسر خواهد شد. بدین ترتیب خطای اختلاف زاویه‌ای شارهای مجازی اینورتر و PCC هم تولید می‌شود. خطای شار و خطای زاویه به کنترل‌کننده هیستریزس وارد می‌شوند. از طرف دیگر، صفحه $\alpha - \beta$ به شش بخش تقسیم می‌گردد و بخشی که بردار شار مجازی اینورتر در آن قرار دارد، تعیین می‌شود.



شکل (۳-۵): طرح کنترل متداول ریزشبه جزیره‌ای مبتنی بر شار مجازی.

بردار کلیدزنی مناسب برای اعمال به اینورتر از یک جدول مراجعه‌ای انتخاب می‌شود که ورودی‌های آن شامل خروجی‌های کنترل‌کننده‌های هیستریزس همراه با موقعیت بردار شار مجازی اینورتر در صفحه $\alpha - \beta$ است. شکل (۴-۵) بردارهای کلیدزنی و همچنین نحوه تقسیم‌بندی صفحه $\alpha - \beta$ را نمایش می‌دهد. تعداد بردارهای کلیدزنی برابر با $2^3 = 8$ است که شامل شش بردار فعال و دو بردار صفر می‌شود.

در این روش، صرفنظر از موقعیت مکانی بردار شار مجازی اینورتر، انتخاب بردار کلیدزنی بهینه مستقل از اندازه خطاهای شار مجازی و اختلاف زاویه‌ای است و فقط به علامت خطای شار و اختلاف زاویه‌ای بستگی دارد که با مقایسه‌کننده‌های هیستریزیس تعیین می‌شوند. با افزایش باند هیستریزیس، فرکانس کلیدزنی کاهش می‌یابد؛ در عین حال که از دقت کنترل ولتاژ و فرکانس کاسته می‌شود. اگرچه با کاهش باند هیستریزیس دقت کنترل ولتاژ و فرکانس افزایش می‌یابد، اما فرکانس کلیدزنی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در این روش کنترلی ضعف‌هایی وجود دارد که ناشی از مقایسه‌کننده‌های هیستریزیس می‌باشد و منجر به افزایش نوسانات اندازه بردار شار مجازی اینورتر و همچنین اختلاف زاویه فاز را می‌شود که این مسئله در شاخص‌های THD ولتاژ و جریان منعکس خواهد شد.



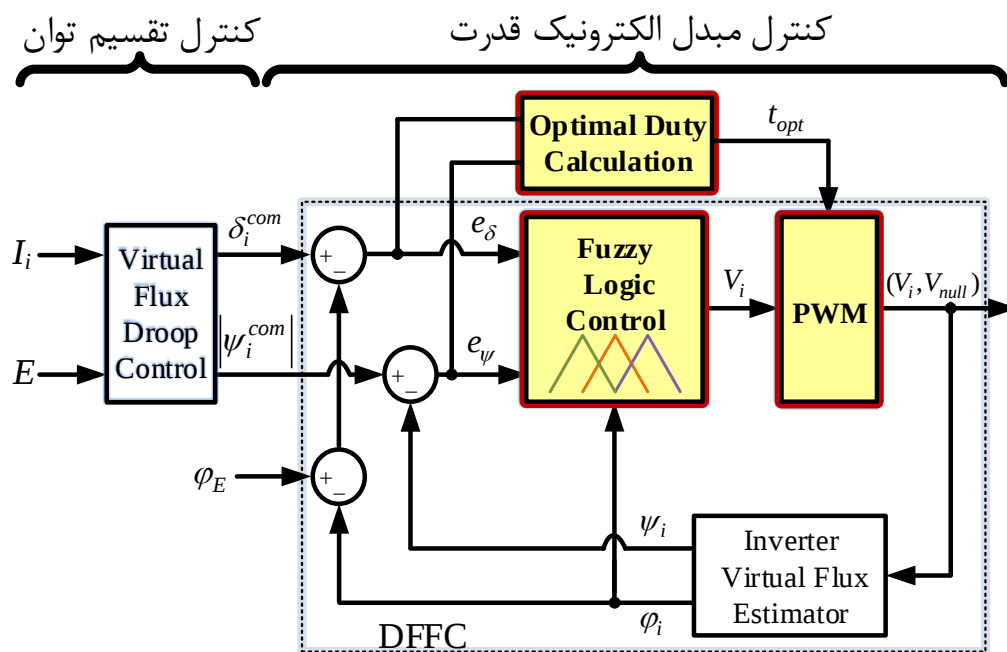
شکل (۴-۵): بردارهای کلیدزنی در صفحه $\alpha - \beta$.

۵-۳- طرح پیشنهادی کنترل مستقیم فازی شار مجازی با زمان وظیفه^۱ بهینه

استفاده از منطق فازی، کنترل سیستم‌ها را بدون دانستن مدل ریاضی حاکم بر فرآیند آنها، ممکن می‌کند [۵۸-۶۱]. به دلیل محدود بودن تعداد بردارهای کلیدزنی و در نظر گرفتن این مسئله که دقت انتخاب بردار کلیدزنی با استفاده از جدول کلیدزنی کم است و هیچکدام از بردارهای کلیدزنی نمی‌توانند تغییرات ولتاژ مطلوب را در خروجی ایجاد کنند، از منطق فازی برای انتخاب بردار کلیدزنی فعال استفاده می‌شود. بنابراین، در این بخش، یک طرح کنترلی جدید مبتنی بر منطق فازی برای انتخاب بردارهای

^۱ Duty Cycle

کلیدزنی مناسب در هر بازه کنترلی ارائه می‌شود که بلوک دیاگرام آن در شکل (۵-۵) نشان داده شده است. تقسیم توان بین منابع متناسب با ظرفیت آنها بر اساس روش کنترل VFD انجام می‌شود. به همین دلیل، مقادیر توان اکتیو و راکتیو تزریقی هر منبع به PCC محاسبه می‌شوند و با استفاده از روش مشخصه افتی شار مجازی، مقادیر مرجع برای اندازه شار مجازی اینورتر و اختلاف زاویه فاز بین بردارهای شار مجازی اینورتر و PCC، محاسبه می‌شوند.



شکل (۵-۵): استراتژی کنترل ریزشبه پیشنهادی مبتنی بر مشخصه شار مجازی، کنترل مستقیم فازی شار مجازی و بهینه‌سازی زمان وظیفه.

برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی، ابتدا با استفاده از وضعیت کنونی کلیدهای اینورتر، بردار کلیدزنی و سپس بردارهای ولتاژ سه فاز خروجی اینورتر محاسبه می‌شوند:

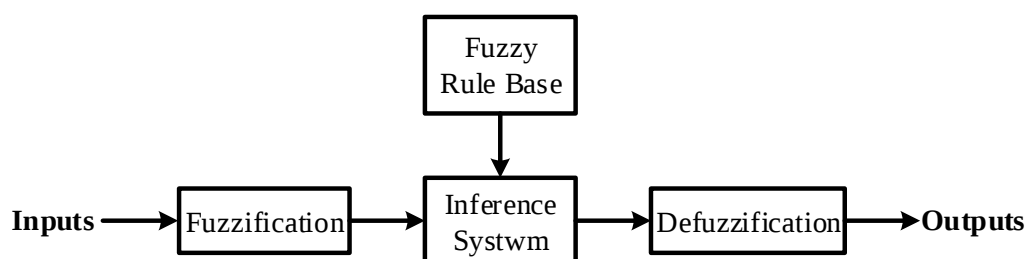
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (۵-۵)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{-\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (۶-۵)$$

$$V_i = V_\alpha + jV_\beta \quad (7-5)$$

که V_{dc} ولتاژ dc ورودی اینورتر v_a ، v_b و v_c بردارهای سه فاز ولتاژ اینورتر هستند. همچنین، s_a ، s_b و s_c وضعیت کنونی کلیدها هستند. اگر کلیدهای مربوطه باز باشند، خواهیم داشت: $s_i = 0$ ($i = a, b, c$) و اگر کلیدهای مربوطه بسته باشند، خواهیم داشت: $s_i = 1$ ($i = a, b, c$). بعلاوه، V_i بردار ولتاژ در صفحه $\alpha - \beta$ است که دارای مولفه‌های V_α و V_β به ترتیب در راستای محورهای α و β است. پس از به دست آوردن مولفه‌های ولتاژ، با استفاده از تعریف شار مجازی، دامنه و زاویه فاز بردار شار مجازی اینورتر محاسبه می‌شوند. از طرف دیگر، زاویه فاز بردار شار مجازی PCC با استفاده از یک مجموعه ولتاژ سه فاز AC با فرکانس نامی، به طور مجازی محاسبه می‌شود. در نتیجه، اختلاف زاویه فاز بین بردارهای شار مجازی اینورتر و PCC تخمین زده می‌شود. اکنون مقادیر تخمین زده شده برای اختلاف زاویه فاز و همچنین اندازه بردار شار مجازی اینورتر با مقادیر مرجع مقایسه خواهند شد.

برای اعمال مقادیر مرجع به دست آمده از روابط مربوط به مشخصه افتی شار مجازی، از روش کنترل مستقیم فازی شار استفاده می‌شود. در این روش، تنظیم‌کننده‌های هیستریزیس و جدول مراجعه‌ای که در روش کنترل مستقیم شار، مورد استفاده قرار می‌گرفتند، با کنترل‌کننده‌های مبتنی بر منطق فازی جایگزین می‌شوند. ورودی کنترل‌کننده منطق فازی، خطای اختلاف فاز، خطای دامنه شار مجازی اینورتر و همچنین ناحیه‌ای از صفحه $\alpha - \beta$ که بردار شار مجازی اینورتر در آن قرار دارد، می‌باشند. متعاقباً، خروجی کنترل‌کننده منطق فازی، بهترین بردار کلیدزنی است که باید به اینورتر اعمال شود. شکل (۵-۶)، ساختار کنترل‌کننده منطق فازی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، کنترل‌کننده منطق فازی از چهار بخش تشکیل شده است که در ادامه عملکرد هر بخش تشریح می‌شود.



شکل (۵-۶): بلوک دیاگرام کنترل مبتنی بر منطق فازی.

فازی سازی^۲

در این بخش با استفاده از توابع عضویت، داده‌های ورودی به متغیرهای فازی تبدیل می‌شوند. توابع عضویت مثلثی برای ورودی‌ها در شکل‌های (۷-۵) تا (۹-۵) آمده است. برای خطا اختلاف زاویه‌ای (e_δ) ۶ تابع عضویت شامل منفی بزرگ (NL)، منفی کوچک (NS)، صفر (Z)، مثبت بزرگ (PL) و منفی کوچک (PS) تعریف می‌شود. برای خطای دامنه شار (e_{ψ}) نیز سه تابع عضویت شامل منفی (N)، صفر (Z) و مثبت (P) تعریف شده است. بازه $[0, 2\pi]$ نیز با توابع عضویت θ_1 تا θ_6 به ۶ بخش تقسیم می‌شود.

قواعد فازی^۳

رفتار کنترل کننده منطق فازی که نحوه ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را مشخص می‌کند، با استفاده از قواعد فازی تعیین می‌شود [۶۲-۶۴]. برای متغیر خروجی تابع عضویتی مشابه شکل (۵-۱۰) تعریف می‌شود که شامل بردارهای کلیدزنی V_0 تا V_7 است. با استفاده از قواعد فازی که در جدول (۵-۱) آمده است، به ازای هر ترکیبی از توابع عضویت ورودی‌ها، تابع عضویت خروجی مربوطه تعیین می‌شود.

استنتاج فازی^۴

روش تفسیر فازی مورد استفاده در این پژوهش مبتنی بر دستورالعمل ممدانی و تصمیم‌گیری min-max است. اگر مقادیر عضویت ورودی‌ها به مجموعه‌های فازی ورودی به ترتیب برابر با $\mu_{\varphi i}$ ، $\mu_{\psi i}$ و $\mu_{\theta i}$ باشند و مقدار عضویت متغیر خروجی هم برابر با μ_{V_i} باشد، ضریب وزنی مربوطه برای قاعده a_i (به صورت روابط زیر محاسبه می‌شود).

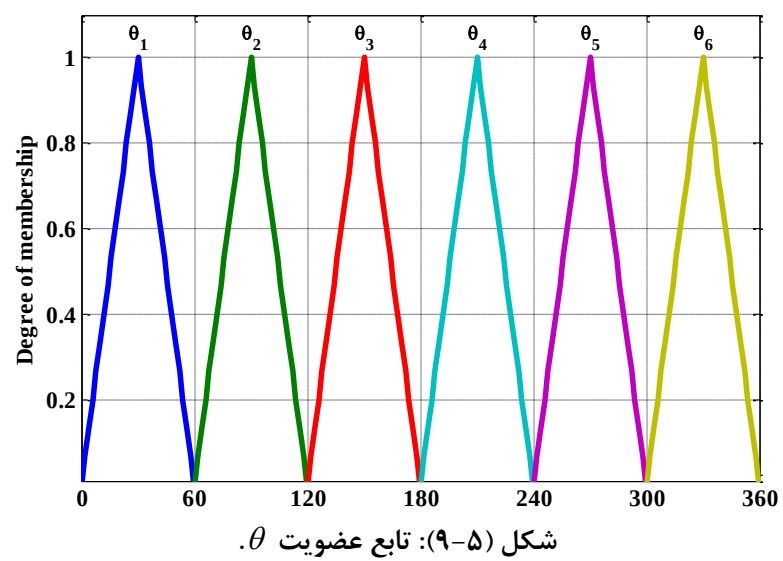
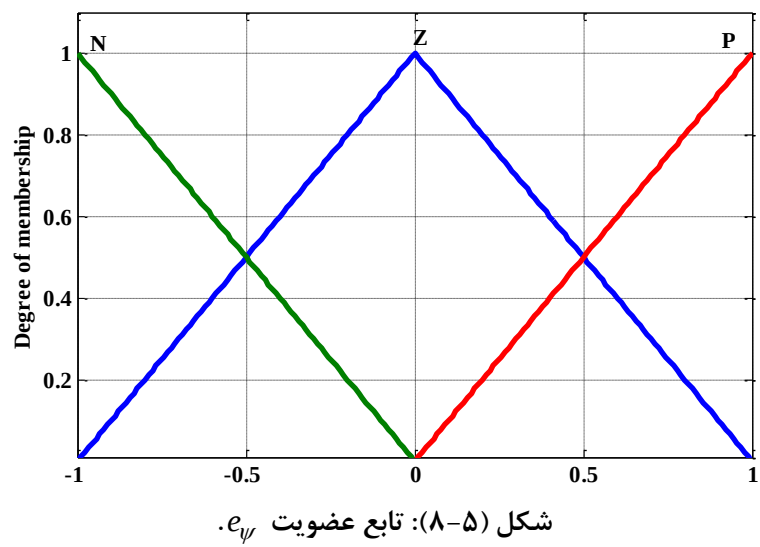
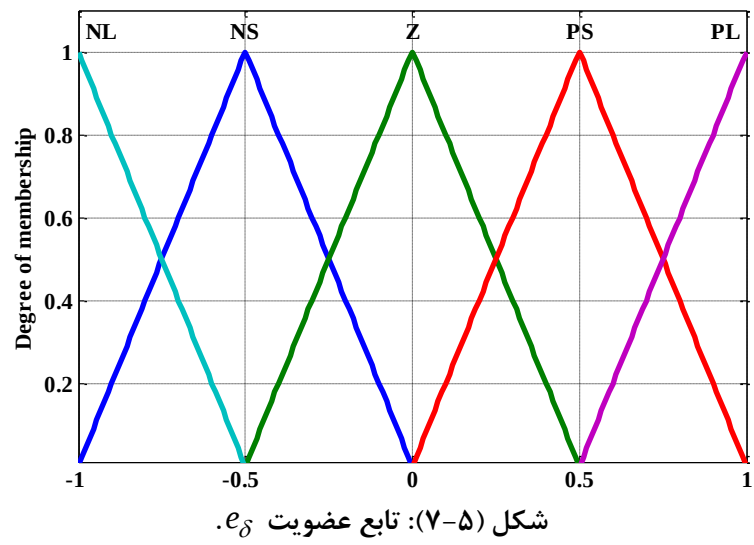
$$a_i = \min(\mu_{\varphi i}, \mu_{\psi i}, \mu_{\theta i}) \quad (۸-۵)$$

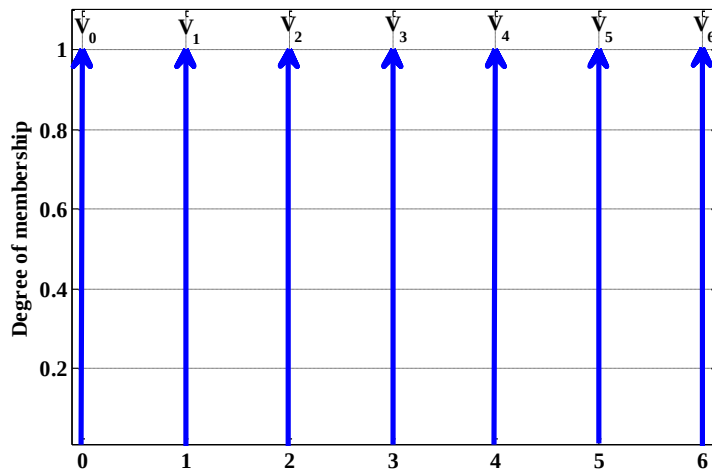
$$\mu'_{V_i} = \max(a_i, \mu_{V_i}) \quad (۹-۵)$$

^۲ Fuzzification

^۳ Fuzzy Rule Base

^۴ Inference System





شکل (۵-۱۰): تابع عضویت متغیر خروجی.

جدول (۵-۱): جدول بردارهای کلیدزنی مبتنی بر کنترل کننده منطق فازی.

e_{ψ}	e_{δ}	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
N	NL	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4
	NS	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4
	Z	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0
	PS	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	PL	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
Z	NL	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	NS	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	Z	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0
	PS	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	PL	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
P	NL	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	NS	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	Z	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0
	PS	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	PL	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1

تبدیل کمیت‌های فازی به کمیت‌های عددی

در این بخش با استفاده از روش SOP، مقادیر فازی به مقادیر قطعی بردارهای کلیدزنی V_0 تا V_7 تبدیل

می‌شوند:

$$\mu'_{V_{out}} = \max_{i=1}^{90}(\mu'_{V_i}) \quad (۵-۱۰)$$

بهینه‌سازی زمان وظیفه

بردار ولتاژ مطلوبی که نیاز است تا تغییرات مناسب در اختلاف زاویه فاز و همچنین اندازه بردار شار مجازی اینورتر ایجاد کند، توسط هیچکدام از بردارهای کلیدزنی تولید نمی‌شود. بنابراین رپیل شار مجازی اینورتر اجتناب ناپذیر است. برای حل این مسئله، در این پژوهش پیشنهاد شده است که به جای اعمال تنها یک بردار کلیدزنی در هر دوره کنترل، از ترکیب دو بردار کلیدزنی استفاده شود. لازم به ذکر است که این ایده قبلاً برای کنترل محرکه در موتورهای القایی مبتنی بر روش‌های کنترل مستقیم گشتاور و کنترل مدل پیش‌بین گشتاور با موفقیت به کار برده شده است [۶۵-۶۶] و کاربرد آن به کنترل ریزشکه تعمیم داده شده است. اساس این روش بدین صورت می‌باشد که به جای اختصاص تمام دوره کنترل، تنها بخشی از دوره کنترل برای اعمال یک بردار فعال که از طریق روش کنترل مستقیم فازی شار مجازی تعیین می‌شود، اختصاص یابد و در زمان باقی‌مانده از دوره کنترل یک بردار کلیدزنی غیرفعال به اینورتر اعمال شود. مدت زمان بهینه اعمال بردار فعال (d) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d = \left| \frac{e_\delta}{C_\delta} \right| + \left| \frac{e_\psi}{C_\psi} \right| = \left| \frac{\delta^{com} - \delta^{est}(k)}{C_\delta} \right| + \left| \frac{|\psi|^{com} - |\psi|^{est}(k)}{C_\psi} \right| \quad (۱۱-۵)$$

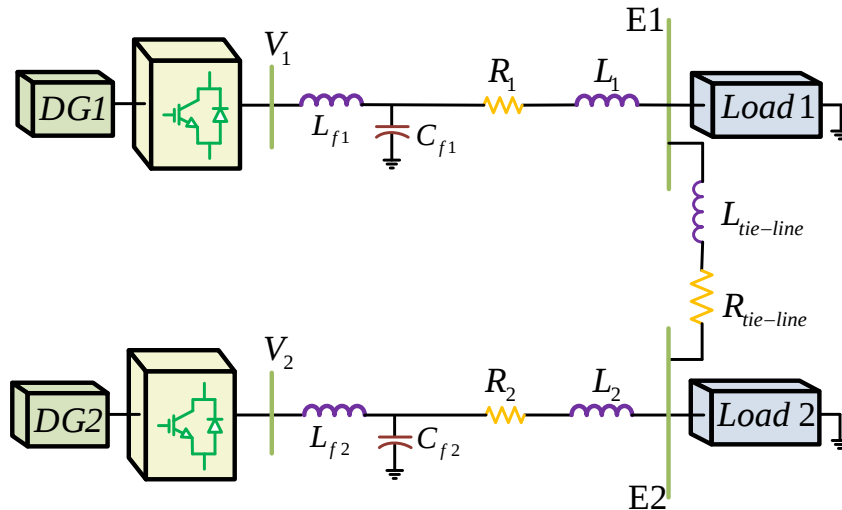
که $\delta^{est}(k)$ و $|\psi|^{est}(k)$ به ترتیب مقادیر تخمین‌زده شده برای اختلاف زاویه فاز و دامنه بردار شار مجازی اینورتر در لحظه k^{th} هستند. C_δ و C_ψ هم دو ضریب ثابت مثبت هستند. بنابراین زمان وظیفه بهینه با یک روش ساده، سریع و مقاوم محاسبه می‌شود و به پارامترهای شبکه بستگی ندارد.

۵-۴- ارزیابی عملکرد کنترل مستقیم فازی شار مجازی با زمان وظیفه بهینه

به منظور ارزیابی عملکرد طرح کنترل پیشنهادی از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink بهره برده می‌شود. در این راستا، دو سناریو از ریزشکه در نظر گرفته می‌شود. در سناریوی اول، فیلترهای L-C در نزدیکی واحدهای DG قرار داده می‌شوند. در سناریوی دوم، فیلترهای L-C در نزدیکی بار تعبیه می‌شوند. پارامترهای اندازه سلف و خازن برای هر دو واحد DG به طور مشابه انتخاب شده است.

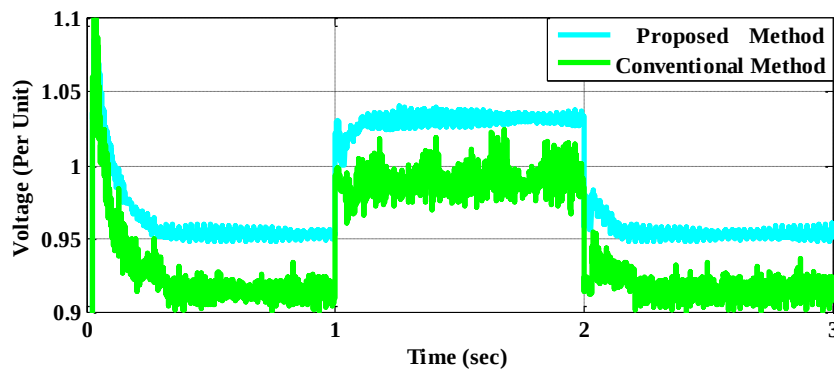
سناریو اول: استفاده از فیلتر L-C در نزدیکی واحد DG

یک ریزشبه جزیره‌ای مشابه شکل (۵-۱۱) در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای کنترل و ریزشبه در جدول (۵-۲) آمده است. بارهای ریزشبه به طور پله‌ای در لحظه $t=1s$ کاهش می‌یابند و سپس در لحظه $t=2s$ به مقدار اولیه خود افزایش می‌یابند.



شکل (۵-۱۱): دیاگرام شماتیک ریزشبه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو اول.

شکل (۵-۱۲) دامنه ولتاژ باس E1 را برای روش متداول و روش پیشنهادی برحسب پریونیت نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، دیده می‌شود که رپل ولتاژ در روش پیشنهادی نسبت به روش متداول کمتر است. بعلاوه، دامنه ولتاژ با وجود تغییرات بار، در روش پیشنهادی در محدوده مجاز حفظ می‌شود، در صورتی که بر اساس روش متداول، دامنه ولتاژ، از محدوده مجاز خارج می‌شود. بنابراین، عملکرد مناسب روش پیشنهادی در کنترل ولتاژ، تایید می‌شود.



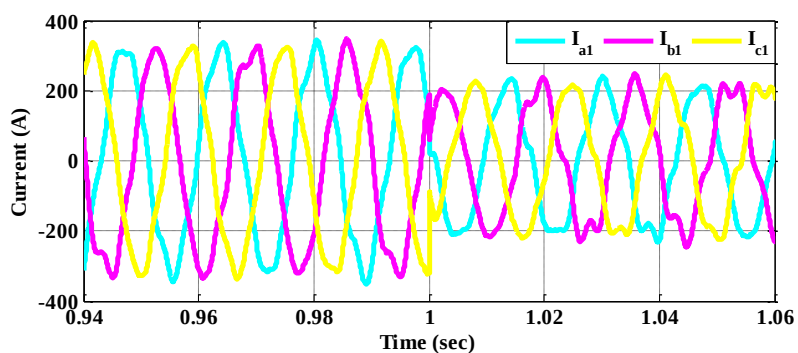
شکل (۵-۱۲): ولتاژ طرف بار برای واحد DG1 در سناریو اول.

شکل (۵-۱۳) منحنی جریان‌های تزریقی سه‌فاز را برای هر دو روش متداول و روش پیشنهادی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، ملاحظه می‌شود که دامنه جریان با کاهش بار در ریزشبه کاهش می‌یابد؛ بعلاوه، ریپل جریان در روش پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش متداول کاهش یافته است.

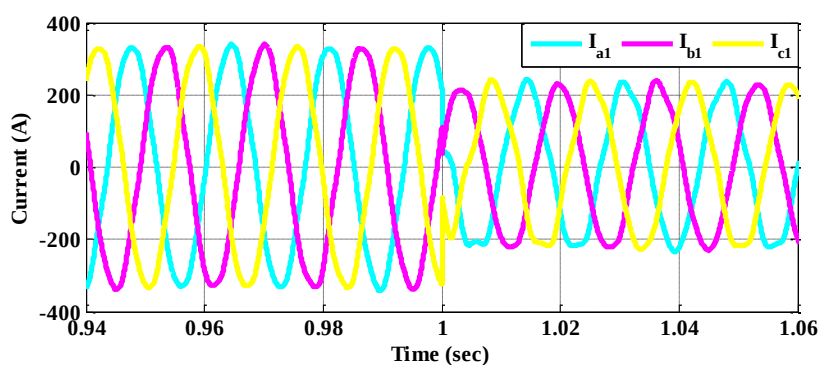
شکل (۵-۱۴) جریان‌های تزریقی فاز a برای هر دو واحد DG را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود که دامنه جریان‌ها تقریباً متناسب با ظرفیت واحدهای DG در هر دو روش متداول و روش پیشنهادی است؛ اما در روش پیشنهادی، انحرافات جریان کمتری وجود دارد. بنابراین، کنترل بهتر جریان در روش پیشنهادی تایید می‌شود.

جدول (۵-۲) اندازه متغیرهای ریزشبه و کنترل در سناریو اول.

اندازه	کمیت
0.04 Ω	مقاومت خط
4 mH	اندوکتانس خط
130 μ F	فیلتر خازنی
3600 V	ولتاژ نامی
60 Hz	فرکانس نامی
10 kV	ولتاژ ورودی اینورترها
7.797 Wb	دامنه نامی شار مجازی
1500 kW	مقدار نامی توان اکتیو DG1
600 kVar	مقدار نامی توان راکتیو DG1
1200 kW	مقدار نامی توان اکتیو DG2
500 kVar	مقدار نامی توان راکتیو DG2
-1.67×10^{-8} rad/W	ضریب مشخصه افتی $P - \delta$ برای DG1
-2.65×10^{-6} Wb/Var	ضریب مشخصه افتی $Q - \psi $ برای DG1
-1.54×10^{-7} rad/W	ضریب مشخصه افتی $P - \delta$ برای DG2
-2.55×10^{-6} Wb/Var	ضریب مشخصه افتی $Q - \psi $ برای DG2

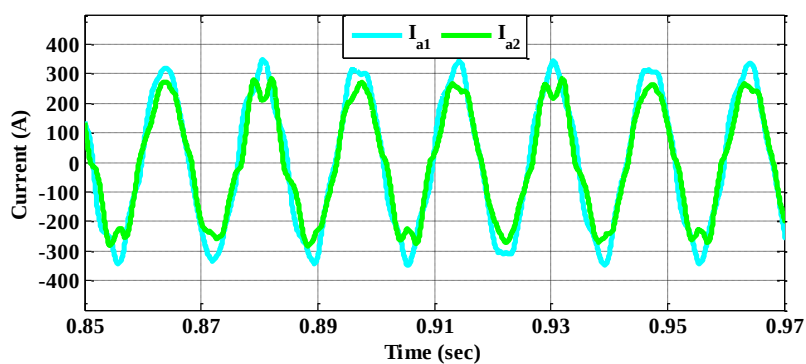


(الف)

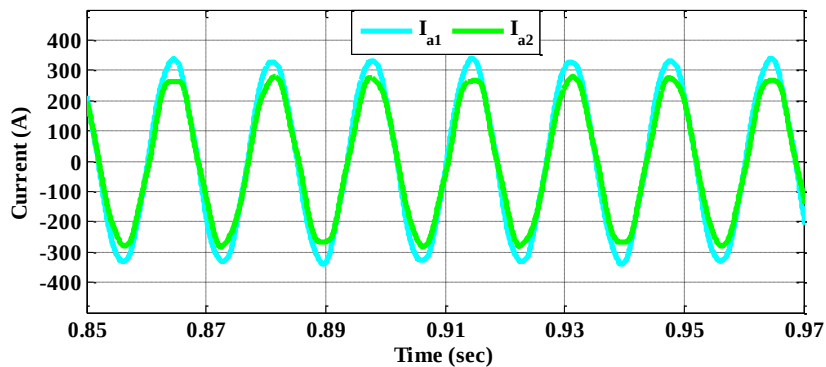


(ب)

شکل (۵-۱۳): منحنی جریان‌های سه فاز تزریقی DG1 به ریزشبه در سناریو اول: (الف) روش متداول، (ب) استراتژی پیشنهادی.



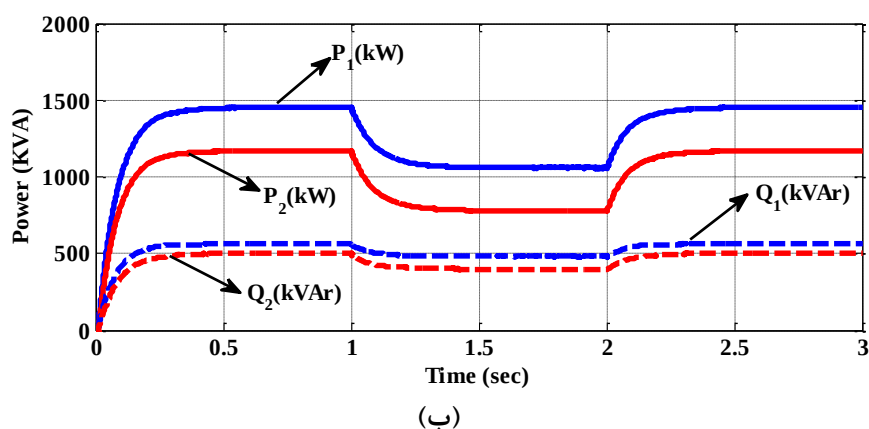
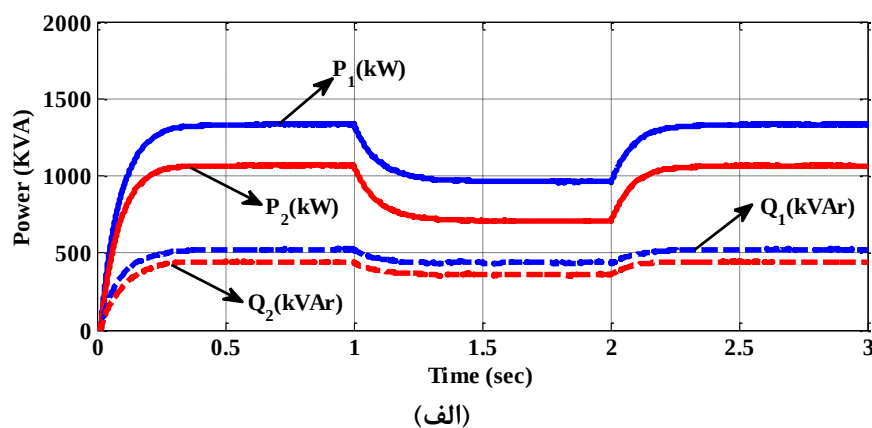
(الف)



(ب)

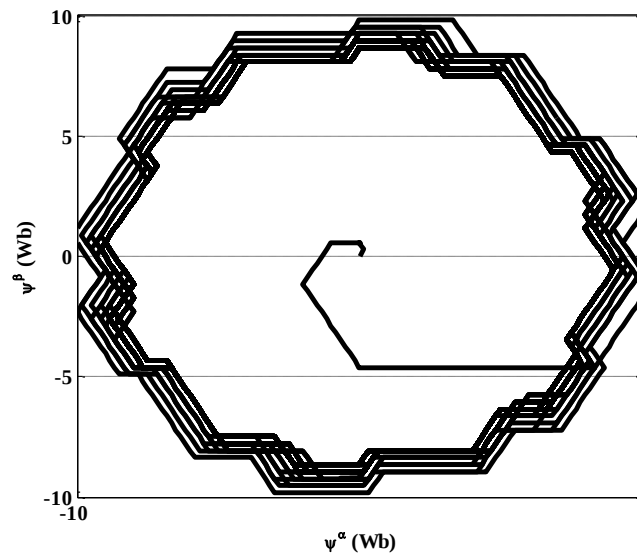
شکل (۵-۱۴): منحنی جریان‌های تزریقی DGها به ریزشبه در سناریو اول: (الف) روش متداول، (ب) استراتژی پیشنهادی.

شکل (۵-۱۵) منحنی توان‌های اکتیو و راکتیو تحویلی هر دو واحد DG به ریزشکه را به ترتیب برای روش متداول و همچنین روش پیشنهادی، نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، با استفاده از روش پیشنهادی، نسبت توان‌های تزریقی به ریزشکه متناسب با ظرفیت واحدهای DG است و در نتیجه خطای تقسیم توان در روش پیشنهادی به طور موثری نسبت به روش متداول کاهش یافته است که این امر، عملکرد بهتر روش پیشنهادی در تقسیم توان را تایید می‌کند.

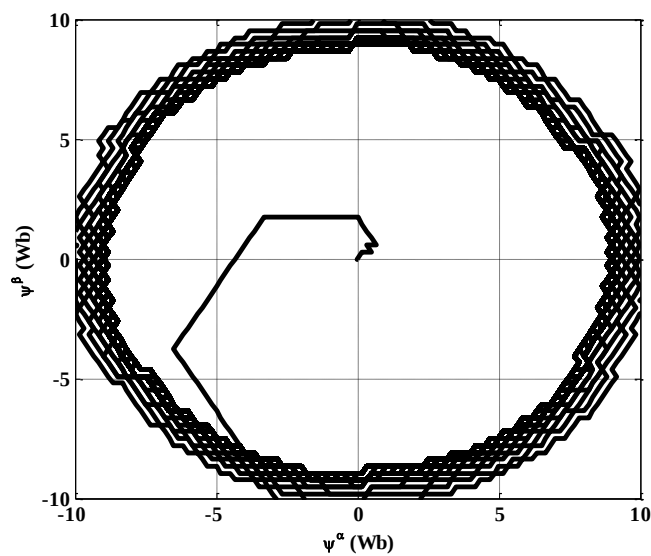


شکل (۵-۱۵): توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی واحدهای DG به ریزشکه در سناریو اول: (الف) روش متداول، (ب) استراتژی پیشنهادی.

مسیر بردار شار مجازی اینورتر ۱ در صفحه $\alpha - \beta$ در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است. با کنترل شار مجازی اینورتر، دامنه آن در مقدار ثابت و اختلاف زاویه آن نسبت به بردار شار مجازی طرف بار در مقدار مشخصی حفظ می‌شود، همانطور که مشاهده می‌شود، منحنی مسیر بردار شار مجازی در روش پیشنهادی، شباهت بیشتری به دایره دارد که این امر نشان می‌دهد روش پیشنهادی عملکرد مناسب‌تری در کنترل شار نشان می‌دهد.



(الف)



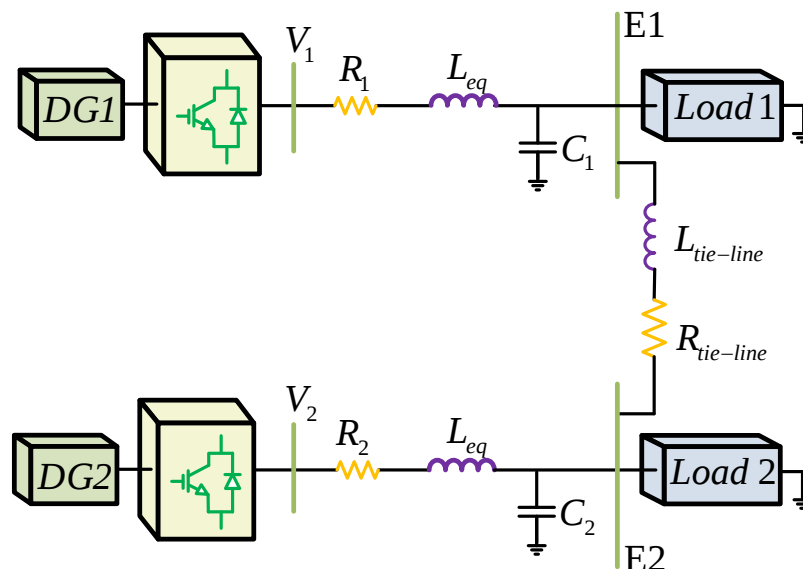
(ب)

شکل (۵-۱۶): منحنی شار مجازی اینورتر ۱ در صفحه $\alpha - \beta$ در سناریو اول:
(الف) روش متداول، (ب) استراتژی پیشنهادی.

سناریو دوم: استفاده از فیلتر L-C در نزدیکی بار

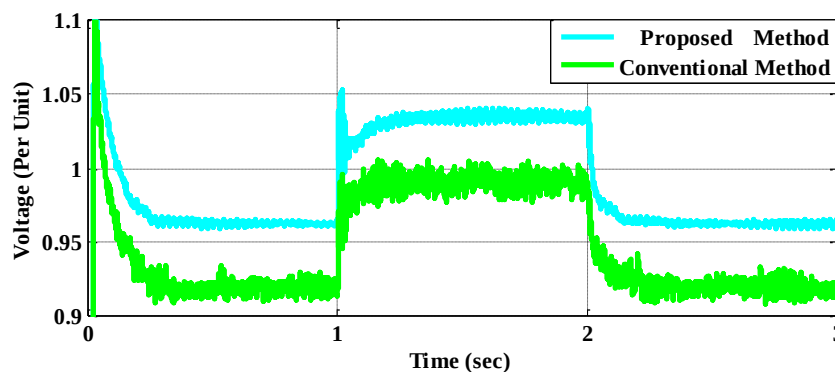
یک ریز شبکه جزیره‌ای مطابق شکل (۵-۱۷) شبیه‌سازی می‌شود که در آن، فیلتر L-C در نزدیکی بار تعبیه شده است. سلف خط و سلف فیلتر به صورت یکجا و با L_{eq} شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش متداول کنترل مستقیم شار مقایسه می‌شوند. پارامترهای

ریزشبکه در جدول (۳-۵) آمده است. در لحظه $t=1s$ بار به طور پله‌ای کاهش می‌یابد. سپس در لحظه $t=2s$ به مقدار اولیه خود افزایش می‌یابد.



شکل (۵-۱۷): دیاگرام شماتیک ریزشبکه جزیره‌ای مورد مطالعه در سناریو دوم.

شکل (۵-۱۸)، منحنی ولتاژ طرف بار بر حسب پریونیت برای واحد DG1 را برای روش متداول و روش پیشنهادی نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود، با وجود تغییرات بار، تغییرات ولتاژ در روش پیشنهادی در محدوده مجاز می‌باشد، در صورتی که در روش متداول، تغییرات ولتاژ از محدوده مجاز خارج می‌شود، بعلاوه، رپیل ولتاژ با استفاده از روش پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌ای از روش متداول کمتر است.

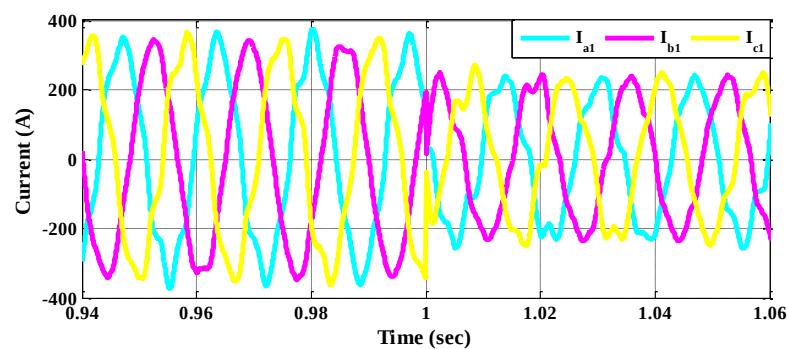


شکل (۵-۱۸): ولتاژ طرف بار برای واحد DG1 در سناریو دوم: (الف) روش متداول، (ب) استراتژی پیشنهادی.

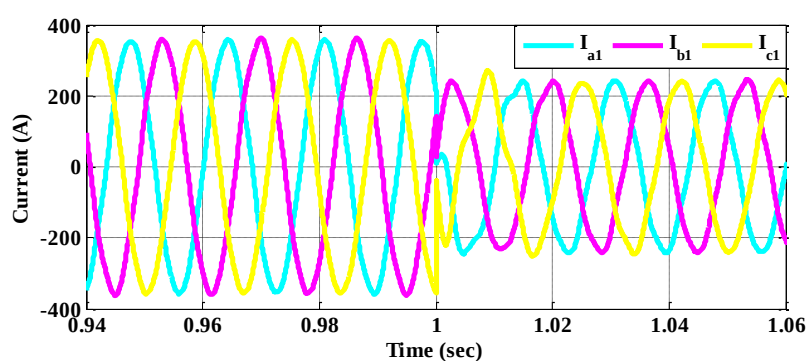
جریان‌های سه فاز تزریقی واحد DG1 ریزشبه در شکل (۵-۱۹) آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش رپیل جریان در روش پیشنهادی، کیفیت جریان‌های تزریقی در روش پیشنهادی نسبت به روش متداول بهتر است. شکل (۵-۲۰) شکل موج جریان تزریقی فاز a برای هر دو واحد DG را نشان می‌دهد. اگرچه نسبت جریان‌های تزریقی واحدهای DG تقریباً متناسب با ظرفیت واحدها است، اما به دلیل عملکرد بهتر روش پیشنهادی در کنترل جریان، شکل موج‌های جریان در روش پیشنهادی به منحنی‌های سینوسی شباهت بیشتری دارند. بنابراین عملکرد بهتر روش پیشنهادی در کنترل جریان، تایید می‌شود.

جدول (۵-۳) اندازه متغیرهای ریزشبه و کنترل در سناریو دوم.

اندازه	کمیت
0.04Ω	مقاومت خط
6 mH	اندوکتانس خط
120 μ F	فیلتر خازنی
3600 V	ولتاژ نامی
60 Hz	فرکانس نامی
10 kV	ولتاژ ورودی اینورترها
7.797 Wb	دامنه نامی شار مجازی
1650 kW	مقدار نامی توان اکتیو DG1
800 kVar	مقدار نامی توان راکتیو DG1
1300 kW	مقدار نامی توان اکتیو DG2
600 kVar	مقدار نامی توان راکتیو DG2
$-1.67 \times 10^{-8} \text{ rad/W}$	ضریب مشخصه افتی $P - \delta$ برای DG1
$-2.65 \times 10^{-6} \text{ Wb/Var}$	ضریب مشخصه افتی $Q - \psi $ برای DG1
$-1.54 \times 10^{-7} \text{ rad/W}$	ضریب مشخصه افتی $P - \delta$ برای DG2
$-2.55 \times 10^{-6} \text{ Wb/Var}$	ضریب مشخصه افتی $Q - \psi $ برای DG2

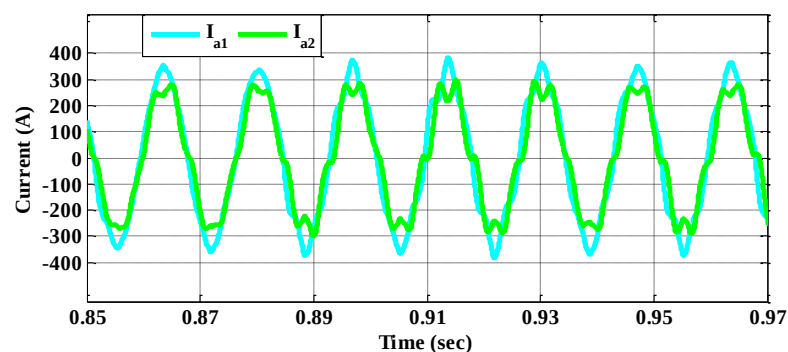


(الف)

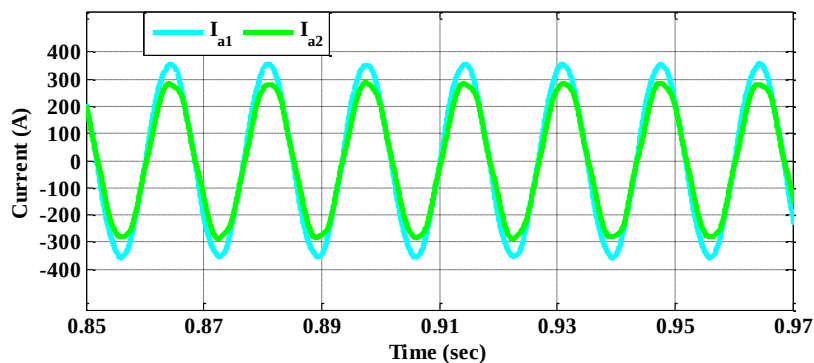


(ب)

شکل (۵-۱۹): منحنی جریان‌های سه‌فاز تزریقی DG1 به ریزش‌بکه در سناریو دوم: (الف) روش متداول، (ب) استراتژی پیشنهادی.



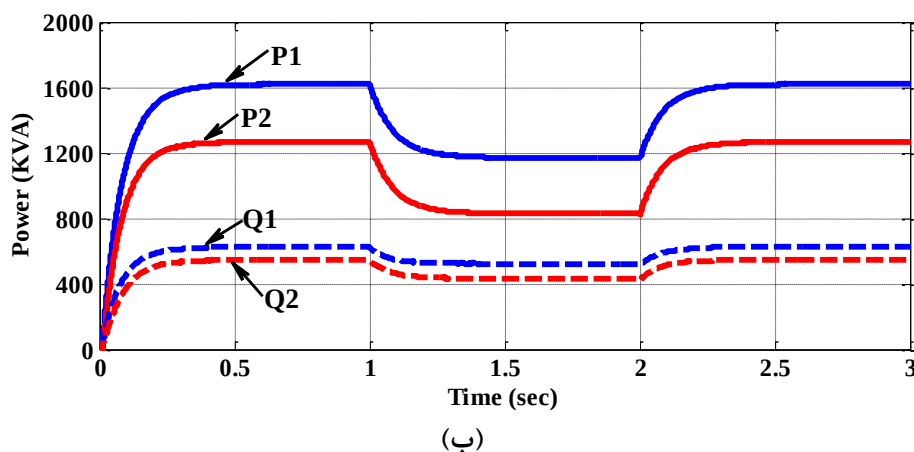
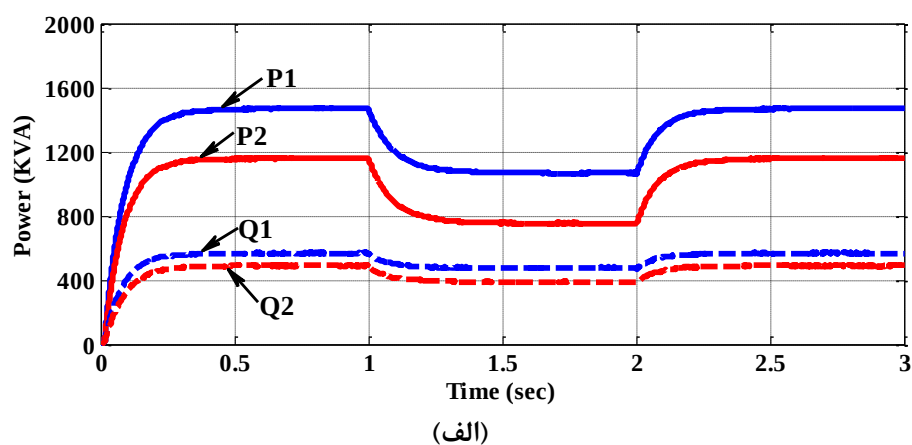
(الف)



(ب)

شکل (۵-۲۰): منحنی جریان‌های تزریقی DGها به ریزش‌بکه در سناریو دوم: (الف) روش متداول، (ب) استراتژی پیشنهادی.

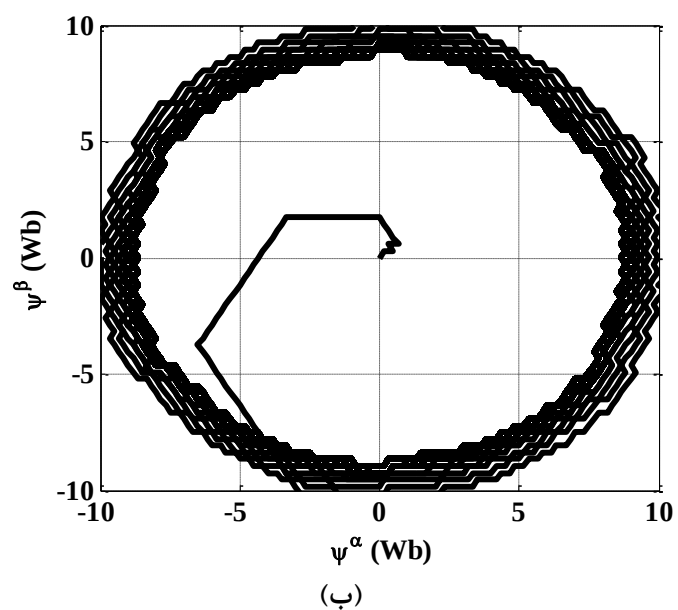
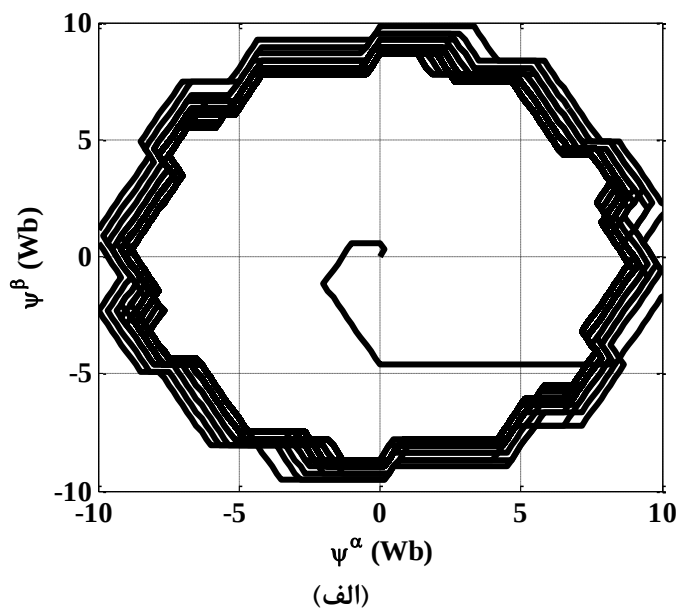
توان تزریقی به ریزشبه توسط واحدهای DG برای روش متداول و همچنین روش پیشنهادی در شکل (۵-۲۱) نشان داده شده است. بار به صورت امپدانس ثابت مدل شده است. در نتیجه توان جذب شده توسط بار متناسب با مجذور ولتاژ طرف بار است. در هر دو روش، عملکرد دینامیکی مطلوبی مشاهده می‌شود. با این وجود، به دلیل عملکرد بهتر روش پیشنهادی در کنترل ولتاژ، دامنه ولتاژ در روش متداول، کمتر از روش پیشنهادی می‌باشد که این مسئله توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی منابع به ریزشبه را کاهش می‌دهد.



شکل (۵-۲۱): توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی واحدهای DG به ریزشبه در سناریو دوم: (الف) روش متداول، (ب) استراتژی پیشنهادی.

شکل (۵-۲۲)، مسیر بردار شار مجازی اینورتر ۱ در صفحه $\alpha - \beta$ را نشان می‌دهد. هدف از کنترل شار مجازی، حفظ دامنه آن‌ها در مقدار ثابت و همچنین حفظ اختلاف زاویه آن‌ها نسبت به بردار شار مجازی در طرف بار است. همانطور که مشاهده می‌شود، شکل منحنی مسیر بردار شار مجازی در روش

پیشنهادی نسبت به روش متداول، به شکل دایره نزدیک تر است که عملکرد بهتر روش پیشنهادی در کنترل شار را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۲): منحنی شار مجازی اینورتر ۱ در صفحه $\alpha - \beta$ در سناریو دوم:
(الف) روش متداول، (ب) استراتژی پیشنهادی.

۵-۵- جمع‌بندی

در استراتژی کنترل ریزشبه مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی، به طور متداول از تکنیک کنترل مستقیم شار مجازی برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی بهره برده می‌شود. ساختار این تکنیک کنترلی

ساده است و بردار کلیدزنی مناسب در هر دوره کنترلی با استفاده از تنظیم‌کننده‌های هیستریزیس و یک جدول مراجعه‌ای استفاده می‌شود.

استفاده از تنظیم‌کننده‌های هیستریزیس در تکنیک کنترل مستقیم شار مجازی منجر به نوسانات ولتاژ و جریان می‌شود. از طرف دیگر، به دلیل اینکه در روش کنترل مستقیم شار مجازی، هیچکدام از بردارهای کلیدزنی، ولتاژ مطلوب برای ایجاد تغییرات مناسب در اختلاف زاویه‌ای بین بردارهای شار مجازی و همچنین دامنه شار مجازی اینورتر را نمی‌تواند تولید کند، دقت عملکرد کنترل ریزشبه کاهش می‌یابد. به همین منظور، یک روش کنترل مستقیم فازی شار مجازی ارائه شد. خروجی این طرح کنترلی، بردار کلیدزنی مناسب برای اعمال به اینورتر می‌باشد. بعلاوه، به جای اعمال تنها یک بردار کلیدزنی در هر بازه کنترلی، از ترکیب یک بردار کلیدزنی فعال و یک بردار کلیدزنی غیرفعال استفاده می‌شود؛ به صورتی که ابتدا زمان وظیفه بهینه برای اعمال بردار کلیدزنی‌ای که توسط روش کنترل مستقیم فازی شار مجازی تعیین شده است، محاسبه می‌شود و در زمان باقی مانده از دوره کنترل یک بردار کلیدزنی غیرفعال به اینورتر اعمال خواهد شد.

به منظور ارزیابی طرح‌های پیشنهادی برای بهبود فرآیند تولید سیگنال‌های کلیدزنی از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink بهره برده شد. همچنین نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از اعمال طرح کنترل متداول ریزشبه مبتنی بر مشخصه افتی شار مجازی و تکنیک کنترل مستقیم شار مجازی مقایسه شدند.

فصل ششم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

برای کنترل توان در ریزشبه‌های جزیره‌ای به طور متداول از طرح مشخصه اف‌تی مبتنی بر $P-\omega$ و $Q-V$ برای تقسیم توان استفاده می‌شود. اما این طرح کنترلی برای تقسیم توان، دارای معایبی نظیر انحرافات ولتاژ و فرکانس و همچنین خطای تقسیم توان راکتیو است. علاوه، تولید سیگنال‌های کلیدزنی در طرح کنترل توان در ریزشبه‌های جزیره‌ای مبتنی بر مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) است. در نتیجه، به روابط پیچیده برای تبدیل قاب مرجع متغیرهای کنترلی، حلقه خارجی کنترل ولتاژ، حلقه داخلی کنترل جریان و تعداد زیادی تنظیم‌کننده‌های PI نیاز است. بنابراین، تلاش کنترلی قابل توجهی برای حفظ پایداری سیستم باید انجام شود که این امر، استفاده از این روش‌ها را در عمل مشکل خواهد کرد.

برای غلبه بر مشکلات اشاره شده در طرح متداول کنترل تقسیم توان برای ریزشبه‌های جزیره‌ای، استفاده از استراتژی شار مجازی پیشنهاد شد. در این روش، تقسیم توان مبتنی بر مشخصه‌های اف‌تی $P-\delta$ و $Q-|V|$ برای ریزشبه‌های با خطوط اندوکتانسی انجام می‌شود. همچنین، سیگنال‌های کلیدزنی با تکنیک کنترل مستقیم شار مجازی تولید می‌شود. در نتیجه، طرح کنترلی کارآمدی حاصل می‌شود که انحرافات ولتاژ و فرکانس را می‌تواند بهبود دهد. علاوه، با حذف حلقه خارجی کنترل ولتاژ و حلقه داخلی کنترل جریان، عدم نیاز به تنظیم‌کننده‌های PI و مدولاسیون پهنای پالس، طرح کنترلی ساده‌ای را فراهم می‌کند. با این وجود، این طرح کنترلی نیز دارای معایبی نظیر تاثیر نامطلوب نابرابری امپدانس خطوط بر دقت کنترل توان، عملکرد نامناسب در ریزشبه‌های با خطوط مقاومتی، فرکانس کلیدزنی متغیر و اعمال یک بردار کلیدزنی در هر دوره کنترل است. برای غلبه بر این مشکلات، روش‌های کارآمدی در این پژوهش ارائه شد. برای حل مشکل دقت پایین تقسیم توان در شرایط نابرابری امپدانس خطوط، یک روش اصلاح‌شده در فصل سوم ارائه شد که با استفاده از ایده امپدانس‌های مجازی، تاثیرات نامطلوب نابرابری امپدانس خطوط جبران‌سازی شدند. در نتیجه تقسیم توان متناسب با ظرفیت نامی هر

اینورتر به درستی فراهم شد. برای تنظیم پارامترهای طرح پیشنهادی، مدل سیگنال کوچک برای حلقه‌های کنترل $P - \delta$ و $Q - |\psi|$ ارائه شد تا پایداری و رفتار مطلوب پاسخ دینامیکی سیستم کنترل به طور همزمان حاصل شود. برای بهبود عملکرد کنترل توان در ریزشکه‌هایی که امپدانس خطوط دارای خاصیت اهمی هستند، یک طرح کنترلی جدید بر اساس روابط $P - \delta$ و $Q - \delta$ در فصل چهارم پیشنهاد شد که برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی از روش کنترل مدل پیش‌بین شار مجازی بهره می‌برد. این استراتژی کنترلی عملکرد مطلوبی برای تقسیم توان و همچنین تولید سیگنال‌های کلیدزنی می‌تواند فراهم کند. در نتیجه تقسیم توان متناسب با ظرفیت اینورترها به دست آمد و در عین حال، ولتاژ و فرکانس در محدوده مجاز کنترل شدند. سرانجام در فصل پنجم برای اصلاح عملکرد روش کنترل مستقیم شار مجازی با حذف تنظیم‌کننده‌های هیستریزیس یک طرح بهبودیافته برای کنترل مبدل الکترونیک قدرت با استفاده از منطق فازی پیشنهاد شد. همچنین در هر بازه کنترل به جای اعمال تنها یک بردار کلیدزنی، ترکیب یک بردار کلیدزنی فعال و یک بردار کلیدزنی صفر برای اعمال به اینورتر انتخاب شدند. علاوه، زمان وظیفه برای اعمال بردار کلیدزنی فعال با یک طرح کنترل ساده و مقاوم محاسبه شد. برای ارزیابی طرح‌های پیشنهادی از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink استفاده شد. همچنین ریزشکه و طرح کنترل شار مجازی اصلاحی مبتنی بر ایده امپدانس مجازی در محیط آزمایشگاه به طور عملی پیاده‌سازی شد. برای پیاده‌سازی عملی، ابتدا طرح کنترل پیشنهادی در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink اجرا شد. سپس کدهای مورد نیاز با استفاده از Matlab/Embedded Coder تولید شدند و سرانجام روی یک DSP از نوع TMS320F28335 با استفاده از نرم‌افزار Code Composer Studio پیاده‌سازی شد. نتایج به دست آمده با روش متداول کنترل ریزشکه مبتنی بر شار مجازی مقایسه شدند. با تحلیل نتایج به دست آمده، کارایی طرح‌های کنترل پیشنهادی تایید شدند.

۶-۲- پیشنهادات

- با توجه به هدف این پژوهش که مبتنی بر کنترل توان در ریزش شبکه‌های جزیره‌ای است، از تکنیک شار مجازی برای تقسیم توان و روش‌های مبتنی بر کنترل مستقیم شار مجازی برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی بهره برده شد. به منظور انجام پژوهش‌های بیشتر در این راستا، موارد ذیل پیشنهاد می‌شود:
- (۱) طراحی استراتژی کنترل ریزش شبکه مبتنی بر شار مجازی برای بارهای هارمونیکی و غیرخطی.
 - (۲) طراحی یک طرح کنترلی با فرکانس کلیدزنی ثابت برای استراتژی کنترل ریزش شبکه مبتنی بر مشخصه افی شار مجازی اصلاحی با روش‌های کارآمد مدولاسیون بردار فضایی.
 - (۳) طراحی استراتژی تقسیم توان مبتنی بر شار مجازی با ضرایب تطبیقی برای مشخصه افی.
 - (۴) طراحی یک استراتژی کنترل تطبیقی مبتنی بر شار مجازی برای ریزش شبکه‌های با خاصیت اهمی در شرایط نابرابری امپدانس خطوط.
 - (۵) طراحی یک طرح کنترل توان برای ریزش شبکه جزیره‌ای در شرایط وجود خطوط ارتباطی مستقیم بین تمامی باس‌های بار.
 - (۶) طراحی سیستم کنترل ریزش شبکه مبتنی بر شار مجازی با در نظر گرفتن جریان چرخشی.

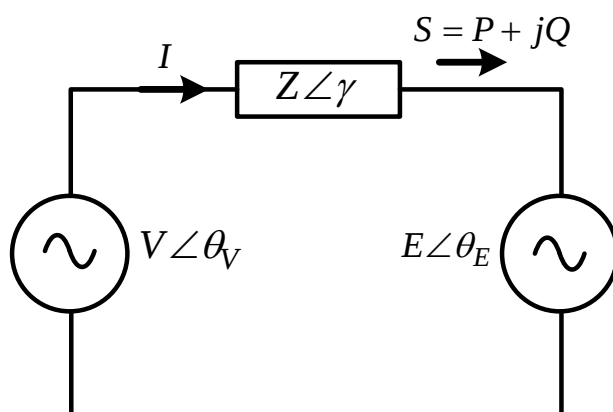
پيوست ۱:

تئورى تقسيم توان

پ-۱- تئوری تقسیم توان

در یک ریزشبه جزیره‌ای که از اینورتر برای اتصال واحدهای DG به ریزشبه استفاده می‌شود، مطابق شکل (پ-۱)، هر واحد به صورت یک منبع ولتاژ مدل می‌شود و از طریق امپدانس خط به باس مشترک متصل می‌شود. توان مختلطی که هر واحد به شبکه تحویل می‌دهد، با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} S &= \vec{V} \times \vec{I}^* \\ &= P + jQ \end{aligned} \quad (\text{پ-۱})$$



شکل (پ-۱): مدار معادل یک واحد DG متصل به باس مشترک.

که S توان مختلط، $\vec{V}$ فازور ولتاژ خروجی اینورتر و $\vec{I}$ فازور جریان خط هستند. همچنین P و Q به ترتیب، توان اکتیو و توان راکتیو تحویل داده شده به باس مشترک هستند. برای محاسبه توان مختلط، ابتدا جریان به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{I} = \frac{\vec{V} - \vec{E}}{\vec{Z}} \quad (\text{پ-۲})$$

که $\vec{E}$ فازور ولتاژ باس مشترک شبکه است. همچنین $\vec{Z}$ امپدانس خط است که Z و γ به ترتیب اندازه و زاویه فاز آن هستند و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X^2} \\ \gamma &= \tan^{-1} \frac{X}{R} \end{aligned} \quad (\text{پ-۳})$$

X و R به ترتیب راکتانس و مقاومت خط هستند. با جایگذاری روابط (پ-۲) و (پ-۳) در رابطه (پ-۱) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} S &= V \angle \theta_V \times \left(\frac{V}{Z} \angle (\gamma - \theta_V) - \frac{E}{Z} \angle (\gamma - \theta_E) \right) \\ &= \frac{V^2}{Z} \angle \gamma - \frac{EV}{Z} \angle (\gamma + (\theta_V - \theta_E)) \end{aligned} \quad (\text{پ-۴})$$

با نوشتن رابطه (پ-۴) به فرم دکارتی و جداسازی بخش‌های حقیقی و موهومی، توان‌های اکتیو و راکتیو حاصل می‌شوند:

$$\begin{aligned} P &= \frac{V^2}{Z} \cos \gamma - \frac{EV}{Z} \cos(\gamma + \delta) \\ &= \frac{(V^2 - EV \cos \delta) \cos \gamma}{Z} + \frac{EV \sin \gamma \sin \delta}{Z} \end{aligned} \quad (\text{پ-۵})$$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{V^2}{Z} \sin \gamma - \frac{EV}{Z} \sin(\gamma + \delta) \\ &= \frac{(V^2 - EV \cos \delta) \sin \gamma}{Z} - \frac{EV \cos \gamma \sin \delta}{Z} \end{aligned} \quad (\text{پ-۶})$$

که δ زاویه قدرت است و برابر است با:

$$\delta = \theta_V - \theta_E \quad (\text{پ-۷})$$

با وجود اینکه زاویه توان کوچک است، خواهیم داشت:

$$\sin \delta \approx \delta \quad (\text{پ-۸})$$

$$\cos \delta \approx 1 \quad (\text{پ-۹})$$

همانطور که دیده می‌شود، امپدانس خط، بر روی توان انتقالی از منابع به باس مشترک تاثیر گذار است. چنانچه، امپدانس خط، کاملاً سلفی یا مقاومتی باشد، روابط مربوط به محاسبه توان ساده‌تر خواهند بود که اکنون، به ازای این حالت‌های مختلف امپدانس خط، روابط توان مورد بررسی قرار می‌گیرند.

پ-۱-۱- امپدانس خط دارای خاصیت سلفی خالص باشد

در این شرایط، با توجه به رابطه (پ-۳) زاویه امپدانس خط $\gamma = 90^\circ$ خواهد بود. در نتیجه: $\sin \gamma = 1$ و $\cos \gamma = 0$. بنابراین روابط (پ-۵) و (پ-۶) برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو به صورت زیر می‌شوند:

$$P = \frac{EV \sin \delta}{X} \quad (\text{پ-۱۰})$$

$$Q = \frac{V^2 - EV \cos \delta}{X} \quad (\text{پ-۱۱})$$

همچنین با توجه به روابط (پ-۸) و (پ-۹) نتیجه می‌شود:

$$P \approx \frac{EV}{X} \delta \quad (\text{پ-۱۲})$$

$$Q = \frac{V}{X} (V - E) \quad (\text{پ-۱۳})$$

به عبارت دیگر، در یک خط با خاصیت القایی خالص، توان‌های اکتیو و راکتیو به ترتیب با اختلاف زاویه و اختلاف دامنه بین فازورهای ولتاژ خروجی اینورتر و باس مشترک متناسب خواهند بود.

پ-۱-۲- امپدانس خط دارای خاصیت اهمی خالص باشد

در حالتی که امپدانس خطوط، به طور کامل، اهمی باشند، زاویه امپدانس خط برابر با $\gamma = 0^\circ$ است. در نتیجه: $\sin \gamma = 0$ و $\cos \gamma = 1$. در این شرایط روابط (پ-۵) و (پ-۶) برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو به صورت روابط زیر ساده می‌شوند:

$$P = \frac{V^2 - EV \cos \delta}{R} \quad (\text{پ-۱۴})$$

$$Q = -\frac{EV \sin \delta}{R} \quad (\text{پ-۱۵})$$

همچنین با توجه به روابط (پ-۸) و (پ-۹) نتیجه می‌شود:

$$P \approx \frac{V}{R} (V - E) \quad (\text{پ-۱۶})$$

$$Q \approx -\frac{EV}{R} \delta \quad (\text{پ-۱۷})$$

به عبارت دیگر، در یک خط با خاصیت اهمی خالص، توان‌های اکتیو و راکتیو به ترتیب با اختلاف دامنه و منفی اختلاف زاویه بین فازورهای ولتاژ خروجی اینورتر و باس مشترک متناسب خواهند بود.

پ-۱-۳- محاسبه افت ولتاژ در امپدانس خط

افت ولتاژ بر روی امپدانس خط منجر به اختلاف ولتاژ بین خروجی اینورتر و باس مشترک می‌شود. برای محاسبه این افت ولتاژ، ابتدا با استفاده از رابطه (پ-۲) و در نظر گرفتن فازور ولتاژ باس مشترک به عنوان مرجع، جریان عبوری از امپدانس خط، مشابه شکل (پ-۱) با رابطه (پ-۱۸) محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{P - jQ}{E} \quad (\text{پ-۱۸})$$

رابطه افت ولتاژ در امپدانس خط به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\Delta V} &= \vec{V} - \vec{E} \\ &= \vec{Z} \times \vec{I} \end{aligned} \quad (\text{پ-۱۹})$$

با جایگذاری پارامترهای امپدانس خط و همچنین رابطه (پ-۲۲) در رابطه افت ولتاژ، نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\Delta V} &= (R + jX) \times \frac{P - jQ}{E} \\ &= \frac{RP + XQ}{E} + j \frac{XP - RQ}{E} \end{aligned} \quad (\text{پ-۲۰})$$

با توجه به کوچک بودن اختلاف زاویه بین فازورهای ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ باس مشترک و در

نظر گرفتن روابط (پ-۸) و (پ-۹)، نتیجه می‌شود [۴۴] و [۴۸]:

$$\overrightarrow{\Delta V} = \frac{RP + XQ}{E} \angle \frac{XP - RQ}{VE} \quad (\text{پ-۲۱})$$

رابطه فوق، در استراتژی کنترل ریزشبه، اهمیت فراوانی دارد.

فهرست مراجع

- [1] B. Adineh, R. Keypour, P. Davari and F. Blaabjerg, **“Review of harmonic mitigation methods in microgrid: from a hierarchical control perspective,”** *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron*, vol. 9, no. 3, pp. 3044-3060, June 2021.
- [2] E. Espina, J. Llanos, C. Burgos-Mellado, R. Cárdenas-Dobson, M. Martínez-Gómez, and D. Sáez, **“Distributed control strategies for microgrids: an overview,”** *IEEE Access*, vol. 8, pp. 193412-193448, Nov. 2020.
- [3] A. Mehrizi-Sani, **“Distributed control techniques in microgrids,”** in *Microgrid: Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2016, pp. 43-62.
- [4] L. H. Koh, P. Wang, F. H. Choo, K. Tseng, Z. Gao, and H. B. Puttgen, **“Operational adequacy studies of a PV-based and energy storage stand-alone microgrid,”** *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 892-900, Mar. 2015.
- [5] M. Hossain, H. Pota, W. Issa, and M. Hossain, **“Overview of AC microgrid controls with inverter-interfaced generations,”** *Int. J. Energies*, vol. 10, no. 9, Aug. 2017.
- [6] Z. Shuai, Y. Sun, Z. J. Shen, W. Tian, C. Tu, Y. Li and X. Yin, **“Microgrid stability: classification and a review,”** *Int. J. Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 167-179, May. 2016.
- [7] J. Hu, J. Zhu, D. G. Dorrell, J. M. Guerrero, **“Virtual flux droop method—A new control strategy of inverters in microgrids,”** *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4704-4711, Sep. 2014.
- [8] H. Bevrani, S. Shokoohi, **“An intelligent droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in islanded microgrids,”** *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1505-1513, Sep. 2013.
- [9] Y. Karimi, H. Oraee, J. M. Guerrero, **“Decentralized method for load sharing and power management in a hybrid single/three-phase islanded microgrid consisting of hybrid source PV/battery units,”** *IEEE Trans. Power Electron.* vol. PP, no. 99, pp.1-1, Oct. 2016.

- [10] I. Alotaibi, M. A. Abido, M. Khalid, and A. V. Savkin, **“A comprehensive review of recent advances in smart grids: a sustainable future with renewable energy resources,”** *Int. J. Energies*, vol. 13, no. 23, 2020.
- [11] Z. Chen, X. Pei, M. Yang, and L. Peng, **“An adaptive virtual resistor (AVR) control strategy for low-voltage parallel inverters,”** *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 1, pp. 863-876, Jan. 2019.
- [12] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla, **“Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-a general approach toward standardization,”** *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2011.
- [13] R. K. Chauhan, and K. Chauhan, **“Distributed energy resources in microgrid: integration, challenges and optimization,”** *Elsevier*, 2019.
- [14] U. S. Environmental Protection Agency, **“Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks:1990–2012,”** 2014.
- [15] F. Blaabjerg, Y. Yang, K. Ma, and X. Wang, **“Power electronics - the key technology for renewable energy system integration,”** *Int. Conf. on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 1618-1626, 2015.
- [16] E.S.N. Raju P, and T. Jain **“Distributed energy resources and control,”** in *Distributed Energy Resources in Microgrids*, United Kingdom, Elsevier, 2019.
- [17] V. K. Sood, and H. Abdelgawad **“Microgrids architectures,”** in *Distributed Energy Resources in Microgrids*, United Kingdom, Elsevier, 2019.
- [18] M. H. Andishgar, E. Gholipour, and R.-A. Hooshmand, **“An overview of control approaches of inverter-based microgrids in islanding mode of operation,”** *Int. J. Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 1043_1060, Dec. 2017.
- [19] A. Ghasemi, M. Banejad, and M. Rahimiyan, **“Integrated energy scheduling under uncertainty in a micro energy grid”** *IET Gener. Transmiss. Distribution*, vol. 12, pp. 2887-2896, 2018.
- [20] M. S Mahmoud, *Microgrid: Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration*. United Kingdom, Elsevier, 2017.

- [21] L. S. De Araujo, A. M. D. S. Alonso and D. I. Brandao, **“Decentralized control of voltage- and current-controlled converters based on AC bus signaling for autonomous microgrids,”** *IEEE Access*, vol. 8, pp. 202075-202089, Nov. 2020.
- [22] U. B. Tayab, M. A. B. Roslan, L. J. Hwai, and M. Kashif, **“A review of droop control techniques for microgrid,”** *Int. J. Renew. and Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 717–727, Sep. 2017.
- [23] J. He, Y. Pan, B. Liang, and C. Wang, **“A simple decentralized islanding microgrid power sharing method without using droop control,”** *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6128-6139, Nov. 2018.
- [24] R. Heydari, T. Dragicevic, and F. Blaabjerg, **“High-bandwidth secondary voltage and frequency control of VSC-based AC microgrid,”** *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 11, pp. 11320-11331, Nov. 2019.
- [25] Q. C. Zhong; and T. Hornik, **“Parallel operation of inverters,”** in *Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration*, IEEE, 2013.
- [26] A. Hirsch, Y. Parag, and J. Guerrero, **“Microgrids: a review of technologies, key drivers, and outstanring issues,”** *Int. J. Renew. and Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, pp. 402–411, 2018.
- [27] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. Canizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke et al., **“Trends in microgrid control,”** *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, May. 2014.
- [28] S. K. Sahoo, A. K. Sinha and N. K. Kishore, **“Control techniques in AC, DC, and hybrid AC–DC microgrid: a review,”** *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron*, vol. 6, no. 2, pp. 738-759, Jun. 2018.
- [29] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su, and J. M. Guerrero, **“Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids,”** *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 200-215, Jan. 2016.
- [30] T. L. Vandoorn, J. D. M. De Kooning, B. Meersman, and L. Vandevelde, **“Review of primary control strategies for islanded microgrids with power-electronic interfaces,”** *Int. J. Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 613-628, Mar. 2013.

- [31] Q. C. Zhong, and Y. Zeng, **“Universal droop control of inverters with different types of output impedance,”** *IEEE Access*, vol. 4, pp. 702-712, Mar. 2016.
- [32] Y. Chen, J. M. Guerrero, Z. Shuai, Z. Chen, L. Zhou and A. Luo, **“Fast reactive power sharing, circulating current and resonance suppression for parallel inverters using resistive-capacitive output impedance,”** *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 8, pp. 5524-5537, Aug. 2016.
- [33] J. Kim, J. M. Guerrero, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and K. Nam, **“Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid,”** *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 689-701, Mar. 2011.
- [34] J. Zhang, J. Shu, J. Ning, L. Huang, and H. Wang, **“Enhanced proportional power sharing strategy based on adaptive virtual impedance in low-voltage networked microgrid,”** *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 11, pp. 2566-2576, Jun. 2018.
- [35] Q. C. Zhong, **“Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel,”** *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1281-1290, Apr. 2013.
- [36] R. Majumder, G. Ledwich, A. Ghosh, S. Chakrabarti, and F. Zare **“Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation,”** *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 2768–2778, Oct. 2010.
- [37] R. Majumder, B. Chaudhuri, A. Ghosh, R. Majumder, G. Ledwich, and F. Zare, **“Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop,”** *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 796-808, May. 2010.
- [38] C. -T. Lee, C. -C. Chu, and P. -T. Cheng, **“A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters,”** *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1980-1993, Apr. 2013.
- [39] J. Zhou, and P. Cheng, **“A modified $Q-\dot{V}$ droop control for accurate reactive power sharing in distributed generation microgrid,”** *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 4, pp. 4100-4109, Jul./Aug. 2019.

- [40] J. Chen, D. Yue, C. Dou, L. Chen, S. Weng, and Y. Li, “**A virtual complex impedance based $P-\dot{V}$ droop method for parallel-connected inverters in low-voltage AC microgrids,**” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 17, no. 3, pp. 1763-1773, Mar. 2021.
- [41] M. Zhang, B. Song, and J. Wang, “**Circulating current control strategy based on equivalent feeder for parallel inverters in islanded microgrid,**” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 595-605, Jan. 2019.
- [42] X. Wu, C. Shen, and R. Iravani “**Feasible range and optimal value of the virtual impedance for droop-based control of microgrids,**” *IEEE Trans. Smart Grid.*, vol. 32, no. 5, pp. 4045-4059, Sep. 2017.
- [43] A. Rahman, I. Syed, and M. Ullah, “**Small-signal stability criteria in AC distribution systems_A review,**” *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 216, Feb. 2019.
- [44] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, “**Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances,**” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 3, pp. 1605-1617, Mar. 2015.
- [45] D. M. Pham and H. Lee, “**Effective coordinated virtual impedance control for accurate power sharing in islanded microgrid,**” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 3, pp. 2279-2288, Mar. 2021.
- [46] F. Zandi, B. Fani, I. Sadeghkhanian and A. Orakzadeh, “**Adaptive complex virtual impedance control scheme for accurate reactive power sharing of inverter interfaced autonomous microgrids,**” *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 12, no. 22, pp. 6021-6032, Dec. 2018.
- [47] A. S. Vijay, N. Parth, S. Doolla, and M. C. Chandorkar, “**An adaptive virtual impedance control for improving power sharing among Inverters in islanded AC microgrids,**” *IEEE Trans. Smart Grid*, 2021, (early access).
- [48] Y. Sun, X. Hou, J. Yang, H. Han, M. Su and J. M. Guerrero, “**New perspectives on droop control in AC microgrid,**” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 7, pp. 5741-5745, Jul. 2017.
- [49] K. Ogata, **Modern Control Engineering**, 5ed, Prentice Hall, 2010, pp. 164-179.

- [50] J. Hu “**predictive direct flux control—A new control method of voltage source inverters in distributed generation applications,**” *Int. J. Energies*. vol. 10, no. 4, 2017.
- [51] S. Vazquez, J. Rodriguez, M. Rivera, L. G. Franquelo and M. Norambuena, “**Model predictive control for power converters and drives: Advances and Trends,**” *IEEE Trans. Ind. Electron.* , vol. 64, no. 2, pp. 935-947, Feb. 2017.
- [52] T. Dragičević, “**Model predictive control of power converters for robust and fast Operation of AC microgrids,**” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 7, pp. 6304-6317, Jul. 2018.
- [53] M. R. Nikzad, B. Asaei, and S. O. Ahmadi, “**Discrete duty-cycle-control method for direct torque control of induction motor drives with model predictive solution,**” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. PP, no. 99, Mar. 2017.
- [54] Y. Zhang, H. Yang, and B. Xia “**Model predictive torque control of induction motor drives with reduced torque ripple,**” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 9, no. 9, pp. 595-604, Jul. 2015.
- [55] T. Chen, O. Abdel-Rahim, F. Peng, and H. Wang, “**An improved finite control set-MPC-based power sharing control strategy for islanded AC microgrids,**” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 52676-52686, 2020.
- [56] W. Cao, M. Han, X. Zhang, W. Xie, G. Agundis-Tinajero and J. M. Guerrero, “**A novel power sharing scheme of controlling parallel-operated inverters in islanded microgrids,**” *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron*, 2020, (early access).
- [57] D. K. Dheer, Y. Gupta and S. Doolla, “**A self-adjusting droop control strategy to improve reactive power sharing in islanded microgrid,**” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 1624-1635, Jul. 2020.
- [58] S. Gdaim, A. Mtibaa, and M. F. Mimouni, “**Design and experimental implementation of DTC of an induction machine based on fuzzy logic control on FPGA,**” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 3, no. 23, pp. 644–655, Jun. 2015.
- [59] M. N. Uddin, and M. Hafeez, “**FLC-based DTC scheme to improve the dynamic performance of an IM drive,**” *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 48, no. 2, pp. 823-831, Mar/Apr. 2012

- [60] V. Naik, A. Panda, and S. P. Singh, **“A three-level fuzzy-2 DTC of induction motor drive using SVPWM,”** *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 3, pp. 1467-1479, Mar. 2016.
- [61] A. R. Solat, A. M. Ranjbari, and B. Mozafari, **“Coordinated control of doubly fed induction generator virtual inertia and power system oscillation damping using fuzzy logic,”** *Int. J. Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 32, no. pp. 536-547, Jan. 2019.
- [62] M. H. Holakooie, M. Ojaghi, and A. Taheri, **“Full-order Luenberger observer based on fuzzy-logic control for sensorless field-oriented control of a single-sided linear induction motor,”** *Int. J. ISA Transactions*, vol. 60, pp. 96-108, Jan. 2016.
- [63] Y. Fu, Z. Zhang, Y. Mi, Z. Li and F. Li, **“Droop control for DC multi-microgrids based on local adaptive fuzzy approach and global power allocation correction,”** *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5468-5478, Sep. 2019.
- [64] M. A. Hannan, Z. A. Ghani, M. M. Hoque, P. J. Ker, A. Hussain and A. Mohamed, **“Fuzzy logic inverter controller in photovoltaic applications: issues and recommendations,”** *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24934-24955, 2019.
- [65] Y. Zhang, and H. Yang, **“Model predictive torque control of induction motor drives with optimal duty cycle control,”** *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 12, pp. 6593-6603, Dec. 2014.
- [66] Y. Zhang and J. Zhu, **“Direct torque control of permanent magnet synchronous motor with reduced torque ripple and commutation frequency,”** *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 1, pp. 235-248, Jan. 2011.

Abstract:

Power control in islanded microgrids including inverter based distributed generations is a challenging issue due to the inaccessibility to the main grid as well as the low inertia of the inverters. The control system should maintain the power balance between the distributed generations and the loads. Simultaneously it should keep the frequency and the voltage within the permissible ranges. In this thesis, the idea of virtual flux is used as the time integral of the voltage and consequently, the virtual flux droop technique is employed. One of the disadvantages of the droop control method is power sharing error in the case of mismatched line impedances. Thus, an improved control strategy based on the virtual flux droop technique is proposed which led to an accurate power sharing proportional to the ratings of the inverters in the case of the mismatched line impedances. Moreover, the power control based on the idea of the virtual flux droop technique has not yet been developed for the islanded microgrids with highly resistive line impedances, which is proposed in this thesis. This proposed power control scheme is based on a novel virtual flux droop technique for controlling power sharing. In addition, the model predictive flux control is developed for controlling the power electronics converters. Accurate power sharing proportional to the ratings of the inverters, improved frequency and voltage control are the advantages of the proposed control strategy.

In this thesis, a novel method based on the direct flux fuzzy control and an optimization duty cycle technique for controlling the power electronics converters is also proposed which allows a more accurate selection of the switching vectors. Therefore, the power control performance is improved and the power sharing is applied proportional to the ratings of the distributed generations. Also, the voltage control is improved.

The proposed control strategies are simulated in the environment of the Matlab/Simulink software. In addition, the proposed microgrid control strategy based on the improved virtual flux droop control is implemented in the laboratory in the case of the mismatched line impedances. The effectiveness of the proposed control schemes is evaluated by analyzing the related results and comparing them with the conventional control strategy of the microgrid.

Keywords: Renewable Energy, Inverter, Power Sharing, Microgrid, Virtual Flux, Droop Control.



Faculty of Electrical Engineering
PH.D. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

**Active and Reactive Power Control Based on
Droop Characteristic in an Islanded Microgrid**

By:
Saheb Khanabdal

Supervisor:
Dr. Mahdi Banejad

Advisor:
Prof. Frede Blaabjerg
Dr. Nasser Hosseinzadeh

October 2021