

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک
گروه قدرت

کاربرد روش کنترل توزیع شده برای بهبود تقسیم توان در یک ریز شبکه جریان مستقیم

نگارنده: محمدرضا میرجعفری

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور:

دکتر حامد ملااحمدیان

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای/خانم محمدرضا میرجعفری

تحت عنوان:

کاربرد روش کنترل توزیع شده برای بهبود تقسیم توان در یک ریزشبکه جریان مستقیم

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و
با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

شکر و قدردانی

شایسته است از استاد فرهیخته، جناب آقای دکتر مهدی بانژاد که با تلاش‌های خود مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند، سپاسگزاری نمایم. همچنین کمال قدردانی را از جناب آقای دکتر حامد ملاحمدیان به عمل می‌آورم که در انجام این پایان‌نامه از راهنمایی‌هایشان به عنوان استاد مشاور بهره برده‌ام.

تعمدنامه

اینجانب محمدرضا میرجعفری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق-قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کاربرد روش کنترل توزیع شده برای بهبود تقسیم

توان در یک ریزشبه جریان مستقیم تحت راهنمایی دکتر مهدی بانژاد متعهد می شوم که:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

یکی از مهم‌ترین اهداف کنترلی در ریزشبکه‌های DC تقسیم بار صحیح بین واحدهای تولید پراکنده در حالت جزیره‌ای است. معمولاً برای دستیابی به این هدف از روش کنترل افقی استفاده می‌شود که یک روش غیرمتمرکز است. تقسیم بار در ریزشبکه DC با استفاده از کنترل افقی با دو محدودیت روبه‌رو است. اولاً این روش سبب انحراف ولتاژ در خروجی مبدل می‌شود، ثانیاً در کنترل افقی اثر امپدانس خط در نظر گرفته نمی‌شود، بنابراین ضروری است از یک کنترل‌کننده ثانویه در راستای بهبود عملکرد کنترلی ریزشبکه DC استفاده شود.

هدف اصلی این پایان‌نامه ارائه یک روش کنترل توزیع‌شده جدید در سطح کنترل ثانویه به منظور مقابله با محدودیت‌های کنترل افقی است. در این راستا یک ریزشبکه DC در نظر گرفته شده که منابع تولید پراکنده در آن با استفاده از مبدل افزایشده متصل به باس DC، بار موردنظر را در حالت جزیره‌ای تغذیه می‌کنند. از روش کنترل افقی به‌عنوان کنترل اولیه استفاده شده است، با توجه به محدودیت‌های این روش، از کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در سطح کنترل ثانویه استفاده می‌شود تا عملکرد کنترلی ریزشبکه DC بهبود یابد. نتایج حاصل از مدل‌سازی و بررسی پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه DC موردنظر نشان می‌دهند که سیستم ضمن استفاده از روش کنترلی پیشنهادی و تحت تغییرات تاخیر در انتقال اطلاعات، تغییرات بار و تغییرات ضریب افقی پایدار است. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی ریزشبکه DC موردنظر در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink نشان می‌دهند که روش پیشنهادی می‌تواند تقسیم جریان صحیح بین واحدهای DG و تنظیم ولتاژ باس DC را تحت تغییرات بار اهمی و بار توان ثابت تضمین کند.

نتایج حاصل از بکارگیری روش پیشنهادی در یک ریزشبکه DC به صورت عملی کارایی آن را تایید کرده و نشان می‌دهند که روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی می‌تواند بر محدودیت‌های کنترل افقی غلبه کند. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی عملکرد مناسبی تحت تغییرات بار دارد و می‌تواند تقسیم جریان صحیح بین واحدهای تولید پراکنده و تنظیم ولتاژ باس DC را با وجود تغییرات بار تضمین کند.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه DC، کنترل افقی، کنترل توزیع‌شده، پایداری سیگنال کوچک

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- "مدل سازی و تحلیل پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه DC با بکارگیری روش کنترل توزیع شده"
چاپ شده در ۲۸امین کنفرانس مهندسی برق ایران، تبریز، مرداد ۱۳۹۹.

فهرست مطالب

د	فهرست جداول
ه	فهرست شکل‌ها
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ تعریف موضوع.....
۳	۲-۱ انگیزه انجام کار.....
۴	۳-۱ نوآوری.....
۵	۴-۱ ساختار پایان‌نامه.....
۷	فصل ۲: مروری بر مفاهیم اصلی ریزشبه‌های DC
۸	۱-۲ مقدمه.....
۹	۲-۲ ریزشبه.....
۱۰	۳-۲ مبدل‌های DC به DC.....
۱۰	۱-۳-۲ مبدل افزایشنده.....
۱۵	۱-۳-۲-۱ ریل ولتاژ خروجی.....
۱۵	۴-۲ انواع مدل بار در ریزشبه‌های DC.....
۱۶	۱-۴-۲ بار مقاومت ثابت.....
۱۶	۲-۴-۲ بار جریان ثابت.....
۱۷	۳-۴-۲ بار توان ثابت.....
۱۸	۵-۲ کنترل ریزشبه DC.....
۱۸	۱-۵-۲ اهداف کنترل ریزشبه DC.....

۱۸.....	۲-۵-۲ روش‌های کنترلی در ریزشبکه DC
۱۹.....	۱-۲-۵-۲ کنترل اولیه
۲۰.....	۱-۱-۲-۵-۲ کنترل غیرمتمرکز
۲۰.....	۱-۱-۱-۲-۵-۲ کنترل افقی
۲۵.....	۲-۲-۵-۲ کنترل ثانویه
۲۵.....	۱-۲-۲-۵-۲ کنترل متمرکز
۲۶.....	۲-۲-۲-۵-۲ کنترل توزیع‌شده
۲۶.....	۳-۲-۵-۲ کنترل ثالثیه
۲۸.....	۶-۲ جمع‌بندی:
۲۹	فصل ۳: مروری بر کارهای انجام شده در زمینه کنترل توزیع‌شده در ریزشبکه DC
۳۰.....	۱-۳ مقدمه
۳۴.....	۲-۳ سیستم ارتباطی
۳۴.....	۱-۲-۳ روش کنترل توزیع‌شده با برقراری ارتباط کامل
۳۵.....	۲-۲-۳ روش کنترل توزیع‌شده با برقراری ارتباط پراکنده
۳۵.....	۳-۳ مرور مطالعات اخیر انجام شده در زمینه کنترل توزیع‌شده
۴۰.....	۴-۳ جمع‌بندی:
۴۱	فصل ۴: روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در ریزشبکه DC
۴۲.....	۱-۴ مقدمه
۴۲.....	۲-۴ روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی
۴۷.....	۳-۴ مدل‌سازی ریزشبکه DC و تحلیل پایداری سیگنال کوچک
۵۴.....	۴-۴ تاثیر پارامترهای مختلف سیستم بر پایداری سیگنال کوچک ریزشبکه DC
۵۶.....	۵-۴ جمع‌بندی:

فصل ۵: نتایج شبیه‌سازی و کار عملی در محیط آزمایشگاه ۵۷

۵-۱ مقدمه ۵۸

۵-۲ معرفی ریزشبکه DC تحت آزمایش ۵۹

۵-۳ نتایج شبیه‌سازی ۵۹

۵-۳-۱ بررسی عملکرد روش کنترل افی در ریزشبکه DC ۶۰

۵-۳-۲ بررسی کارایی روش کنترلی پیشنهادی در ریزشبکه DC ۶۶

۵-۴ نتایج حاصل از بکارگیری روش پیشنهادی به صورت عملی ۷۷

۵-۵ جمع‌بندی: ۸۴

فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۵

۶-۱ نتیجه‌گیری ۸۶

۶-۲ پیشنهادات ۸۷

پیوست ۸۹

مراجع ۹۱

فهرست جداول

جدول ۴-۱. متغیرهای حالت برای واحد DG اول از ریزشبه DC	۵۱
جدول ۵-۱. پارامترهای ریزشبه DC	۵۹
جدول ۵-۲. پارامترهای واحدهای DG برای ریزشبه DC دوواحدی	۶۰
جدول ۵-۳. تغییرات بار اهمی و توان ثابت در طول آزمایش	۶۲
جدول ۵-۴. پارامترهای واحدهای DG برای ریزشبه DC چهارواحدی	۷۷

فهرست شکل؛

- شکل ۱-۲. ریزشبكة، شامل منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی، واحد کنترل و بار ۱۰
- شکل ۲-۲. مبدل افزایشنده [۱۱] ۱۱
- شکل ۳-۲. مدارمعادل مبدل افزایشنده برای کلید بسته [۱۱] ۱۲
- شکل ۴-۲. مدارمعادل مبدل افزایشنده برای کلید باز [۱۱] ۱۲
- شکل ۵-۲. شکل موج‌های مبدل افزایشنده. الف) ولتاژ سلف؛ ب) جریان دیود؛ ج) جریان سلف؛ د) جریان خازن [۱۱] ۱۴
- شکل ۶-۲. انواع مدل بار در ریزشبكة DC ۱۶
- شکل ۷-۲. مشخصه $v-i$ بار توان ثابت و مقاومت افزایشی منفی [۱۴] ۱۷
- شکل ۸-۲. ساختار کنترل سلسله‌مراتبی یک ریزشبكة [۲] ۱۹
- شکل ۹-۲. روش کنترل غیرمتمرکز ۲۰
- شکل ۱۰-۲. مشخصه افتی $v-i$ ۲۱
- شکل ۱۱-۲. یک ریزشبكة با دو واحد تولید پراکنده [۲] ۲۲
- شکل ۱۲-۲. مشخصه‌های افتی واحدهای DG ریزشبكة [۲] ۲۲
- شکل ۱۳-۲. کنترل اولیه یک ریزشبكة DC با استفاده از کنترل افتی [۲] ۲۳
- شکل ۱۴-۲. بررسی تغییرات مشخصه افتی. الف) تغییرات ضریب افتی ب) تغییرات ولتاژ نامی ۲۴
- شکل ۱۵-۲. روش کنترل متمرکز ۲۵
- شکل ۱۶-۲. روش کنترل توزیع‌شده ۲۶
- شکل ۱۷-۲. کنترل ثالثیه برای مدیریت تبادل توان بین ریزشبكة و شبکه بالادستی [۲] ۲۷
- شکل ۱۸-۲. روش‌های کنترلی ریزشبكة DC [۲۱] ۲۷

- شکل ۳-۱. تاثیر افزایش مقدار ضریب افتی بر خطای تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ [۲۶] ۳۰
- شکل ۳-۲. مشخصه‌های افتی روش پیشنهادی در مرجع [۲۶] ۳۲
- شکل ۳-۳. مقایسه عملکرد روش پیشنهادی در مرجع [۲۶] با روش کنترل افتی متداول ۳۳
- شکل ۳-۴. کنترل اولیه غیرمتمرکز و کنترل ثانویه توزیع شده در یک ریزشبکه DC [۲] ۳۴
- شکل ۳-۵. بلوک دیاگرام روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در مرجع [۳۶] ۳۷
- شکل ۳-۶. بلوک دیاگرام روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در مرجع [۳۷] ۳۸
- شکل ۴-۱. مدل یک ریزشبکه DC با دو واحد تولید پراکنده ۴۳
- شکل ۴-۲. تغییرات مشخصه‌های افتی واحدهای DG در زمان اجرا روش کنترلی پیشنهادی ۴۵
- شکل ۴-۳. بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی ۴۶
- شکل ۴-۴. سیستم ارتباطی بین واحدهای DG در ریزشبکه DC ۴۶
- شکل ۴-۵. مدل ولتاژ و جریان خروجی دو واحد تولید پراکنده در یک ریزشبکه DC ۴۹
- شکل ۴-۶. مدل کلی واحد DG نام از ریزشبکه DC تحت آزمایش ۵۰
- شکل ۴-۷. تغییرات مقادیر ویژه سیستم به ازاء تغییرات تاخیر در انتقال اطلاعات (τ) ۵۴
- شکل ۴-۸. تغییرات مقادیر ویژه سیستم به ازاء تغییرات ضریب افتی (R_d) ۵۵
- شکل ۴-۹. تغییرات مقادیر ویژه سیستم به ازاء تغییرات بار اهمی (R_L) ۵۶
- شکل ۵-۱. ریزشبکه DC شامل دو واحد DG موازی ۵۸
- شکل ۵-۲. نتایج آزمایش اول برای بار اهمی و امپدانس‌های خط برابر با کنترل افتی. الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۶۱
- شکل ۵-۳. نتایج آزمایش دوم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با کنترل افتی. الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۶۳
- شکل ۵-۴. نتایج آزمایش سوم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در مرجع [۳۶]). الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۶۴

- شکل ۵-۵. نتایج آزمایش چهارم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در مرجع [۳۷]). الف) توان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۶۶
- شکل ۵-۶. نتایج آزمایش پنجم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۶۷
- شکل ۵-۷. نتایج آزمایش پنجم برای بار اهمی، امپدانس‌های خط نابرابر و تاخیر ۱۵۰ میلی ثانیه با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۶۹
- شکل ۵-۸. نتایج آزمایش ششم برای بار توان ثابت و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی و جریان بار؛ ب) توان‌های خروجی؛ ج) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۷۰
- شکل ۵-۹. نتایج آزمایش هفتم برای بار توان ثابت و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی و جریان بار؛ ب) توان‌های خروجی؛ ج) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۷۲
- شکل ۵-۱۰. ریزش‌بکه DC با چهار واحد DG ۷۳
- شکل ۵-۱۱. نتایج آزمایش هشتم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۷۴
- شکل ۵-۱۲. نتایج آزمایش نهم برای بار توان ثابت و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۷۵
- شکل ۵-۱۳. نتایج آزمایش دهم برای بار اهمی، امپدانس‌های خط نابرابر و قطع سیستم ارتباطی با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار ۷۶
- شکل ۵-۱۴. نمایش قطع یکی از سیستم‌های ارتباطی بین واحدهای DG در ریزش‌بکه DC ۷۷

- شکل ۵-۱۵. شماتیک نمونه آزمایشگاهی ریزشکه DC ۷۸
- شکل ۵-۱۶. سیستم نمونه ریزشکه DC در آزمایشگاه ۷۸
- شکل ۵-۱۷. فلوچارت عملکرد کنترلی ریزشکه DC در آزمایشگاه ۷۹
- شکل ۵-۱۸. نتایج آزمایش یازدهم (در محیط آزمایشگاه). الف) ولتاژهای خروجی؛ ب) ولتاژ بار؛ ج)
- جریان‌های خروجی ۸۱
- شکل ۵-۱۹. نتایج آزمایش دوازدهم (در محیط آزمایشگاه). الف) ولتاژهای خروجی؛ ب) ولتاژ بار؛ ج)
- جریان‌های خروجی ۸۳

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ تعریف موضوع

یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست محیطی، تولید گازهای گلخانه‌ای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی می‌باشد. در کشورهای مختلف، سوخت‌های فسیلی منابع اصلی در زمینه تولید انرژی الکتریکی به روش متمرکز می‌باشند. شبکه‌های انتقال انرژی الکتریکی متداول با تولید متمرکز محدودیت‌هایی در تامین توان الکتریکی در مناطق دورافتاده دارند، از طرفی در این روش انتقال انرژی الکتریکی با تلفات بیشتری روبه‌رو خواهد بود. در سال‌های اخیر، با پیشرفت‌های شکل گرفته در زمینه تکنولوژی الکترونیک قدرت تحقیقات بر روی واحدهای تولید پراکنده گسترش یافته‌اند. امروزه تعداد زیادی منابع تولید پراکنده شامل منابع انرژی تجدیدپذیر فتوولتائیک^۱، توربین بادی^۲ و... در سیستم‌های قدرت نصب شده‌اند. نصب این تعداد از واحدهای تولید پراکنده می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی در زمینه حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت شود. در راستای حل این مشکلات، مفهوم جدیدی به نام ریزشبکه به وجود آمده است [۱-۳].

یک ریزشبکه از منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی و بار تشکیل می‌شود. ریزشبکه‌ها به دو دسته AC و DC تقسیم‌بندی می‌شوند. بیشتر تحقیقات به صورت اساسی بر روی ریزشبکه‌های AC متمرکز بوده‌اند اما در سال‌های اخیر ریزشبکه‌های DC نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند، چرا که ولتاژ در اکثر منابع تولید پراکنده به صورت جریان مستقیم تولید می‌شود و اکثر بارهای مدرن همچون کامپیوتر، تلویزیون، LED و ... نیز انرژی را از یکسوکننده داخلی به صورت جریان مستقیم دریافت می‌کنند و اتصال این منابع و بارها در قالب یک ریزشبکه DC راندمان سیستم را به دلیل کاهش تعداد مبدل‌های AC/DC و DC/AC بالا می‌برد. علاوه بر این ریزشبکه‌های DC راندمان بهتری در انتقال و توزیع دارند،

^۱ Potovoltaic

^۲ Wind Turbine

چرا که توان راکتیو و مشکلات هارمونیکی وجود ندارند و کیفیت توان نیز می‌تواند به کمک سیستم‌های ذخیره انرژی به آسانی بهبود یابد [۴-۶].

ریزشبکه‌های DC در دو حالت متصل به شبکه^۱ و جزیره‌ای (مستقل از شبکه)^۲ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. مهمترین اهداف کنترلی یک ریزشبکه DC، کنترل ولتاژ و جریان در دو حالت عملکرد متصل به شبکه و جزیره‌ای، تقسیم بار مناسب بین واحدها و عملکرد پایدار سیستم تحت بارهای مختلف می‌باشند. دستیابی به این اهداف با کنترل‌کننده اولیه به روش کنترل افتی^۳ که به صورت رایج برای کنترل واحدهای مختلف ریزشبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد امکان‌پذیر نیست، بنابراین باید در راستای حصول اهداف فوق از کنترل چندسطحی که هر سطح با یکی از روش‌های کنترل متمرکز^۴، غیرمتمرکز^۵ و یا توزیع‌شده^۶ اجرا می‌شود، استفاده شود [۷-۹].

۱-۲ انگیزه انجام کار

همان‌طور که گفته شد، تقسیم توان در ریزشبکه DC با استفاده از کنترل افتی با محدودیت‌هایی روبه‌رو است، چرا که این روش سبب انحراف ولتاژ خروجی مبدل می‌شود و همچنین اثر امپدانس خط در نظر گرفته نمی‌شود. این محدودیت‌ها با استفاده از کنترل‌کننده ثانویه و برقراری یک سیستم ارتباطی با پهنای باند کم بین واحدهای DG یک ریزشبکه قابل حل هستند. روش‌های کنترل ثانویه به دو دسته کنترل متمرکز و کنترل توزیع‌شده تقسیم‌بندی می‌شوند. روش کنترل متمرکز از یک کنترل‌کننده مرکزی استفاده می‌کند که این موضوع پایداری و انعطاف‌پذیری سیستم ریزشبکه را کاهش می‌دهد، لذا امروزه از روش کنترل توزیع‌شده در جهت تقسیم توان متناسب بار استفاده می‌شود که در آن از یک

¹ Grid-connected

² Islanded

³ Droop control

⁴ Centralized control

⁵ Decentralized control

⁶ Distributed control

سیستم ارتباطی با پهنای باند کم استفاده می‌شود. در این راستا، هدف اصلی این پایان‌نامه ارائه یک روش کنترل توزیع‌شده جدید مبتنی بر سیستم ارتباطی با پهنای باند کم به عنوان کنترل‌کننده ثانویه در یک ریزشبکه DC و تجزیه و تحلیل کارایی این روش می‌باشد.

۱-۳ نوآوری

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کنترل توزیع‌شده در سطح کنترل ثانویه برای ریزشبکه‌های DC انجام و روش‌های متعددی پیشنهاد شده است که در فصل سوم برخی از آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. اما هرکدام از این روش‌ها با محدودیت‌ها و معایبی روبه‌رو هستند که در ارائه روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در این پایان‌نامه به آن‌ها توجه شده است. می‌توان گفت مهم‌ترین مزایای استفاده از روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در این پایان‌نامه نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی سهولت در اجرا، عدم نیاز به ارتباط سرتاسری، عدم نیاز به محاسبات پیچیده و همچنین عدم نیاز به تنظیم ضرایب متعدد می‌باشد.

پس از ارائه روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در این پایان‌نامه، مدل‌سازی سیگنال کوچک ریزشبکه DC ضمن استفاده از روش پیشنهادی انجام خواهد شد و پایداری آن بر اساس مکان هندسی ریشه‌های سیستم موردنظر مورد تجزیه و تحلیل دقیق قرار خواهد گرفت. در بررسی پایداری سیستم موردنظر، تاخیر در ارسال و دریافت اطلاعات، تغییرات بار و ضریب افتی در نظر گرفته شده‌اند. پس از بررسی پایداری سیستم موردنظر، کارایی روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink و برای یک ریزشبکه DC که در آن منابع تولید پراکنده با استفاده از نرم‌افزار افزایش بار موردنظر را تغذیه می‌کنند مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در نهایت روش پیشنهادی به صورت عملی در محیط آزمایشگاه بکار گرفته خواهد شد تا صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گیرد.

۴-۱ ساختار پایان نامه

این پایان نامه از شش فصل تشکیل شده است. در فصل دوم ابتدا به معرفی و مدل سازی اجزاء ریز شبکه DC پرداخته خواهد شد، پس از آن کلیه روش های کنترلی در ریز شبکه های DC به ویژه روش کنترل اکتی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت. در فصل سوم کارهای انجام شده در زمینه کنترل توزیع شده مرور شده و به دقت مورد بررسی قرار می گیرند. در فصل چهارم روش کنترل توزیع شده پیشنهادی ارائه خواهد شد و پس از آن پایداری این روش با استفاده از مکان هندسی ریشه ها به دقت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل پنجم این پایان نامه عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در یک ریز شبکه DC و با استفاده از نرم افزار MATLAB/Simulink ارزیابی می شود و در مرحله بعد همین روند در محیط آزمایشگاه و برای یک سیستم ریز شبکه DC واقعی تکرار خواهند شد. در فصل ششم نیز کلیه مطالب پایان نامه مرور و نتیجه گیری لازم ارائه خواهد شد و در نهایت پیشنهاداتی در جهت بهبود عملکرد ریز شبکه های DC و چالش های پیش رو بیان می شود.

فصل ۲: مروری بر مفاهیم اصلی ریز شبکه های DC

۲-۱ مقدمه

در سال ۱۸۸۲ توماس ادیسون در شهر نیویورک اولین نیروگاه و شبکه توزیع برق را با هدف تامین انرژی الکتریکی موردنیاز برای روشنایی بخش مسکونی تاسیس کرد. چندین شبکه توزیع برق مشابه در سال‌های بعد افتتاح شد. در آن زمان سیستم توزیع برق به صورت غیرمتمرکز یا پراکنده بود. به عبارت دیگر، انرژی الکتریکی در یک مکان تولید و مصرف می‌شد و به خطوط انتقال نیازی نبود [۱-۳].

در اوایل قرن بیستم، تمام شرکت‌های برق به دلایلی از جمله لزوم کاهش هزینه‌های تولید و افزایش قابلیت اطمینان برای کلیه مشترکین ادغام شدند. در آغاز سال ۱۹۹۰، شرکت‌های برق یکپارچه به دلیل رشد و شکوفایی جهانی با افزایش عظیمی در مصرف انرژی الکتریکی مواجه شدند که آن‌ها را با چالش‌هایی در تامین انرژی الکتریکی مواجه کرد. این ناتوانی در تامین انرژی الکتریکی از یک طرف و همچنین هشدارهای اخیر در مورد تغییرات آب‌وهوایی و آلودگی محیط زیست ناشی از مصرف بیش از حد از سوخت‌های فسیلی از طرف دیگر منجر به تجدید ساختار سریع در تولید و توزیع انرژی الکتریکی و گسترش استفاده از منابع تولید پراکنده در سراسر جهان شدند [۱-۳].

واحدهای تولید پراکنده، واحدهای تولید انرژی الکتریکی هستند که می‌توانند به صورت مستقیم به شبکه توزیع برق و مصرف‌کننده متصل شوند و تولید انرژی الکتریکی در آن‌ها همانند سیستم‌های قدرت متداول به صورت متمرکز نمی‌باشد. این واحدهای تولید پراکنده می‌توانند بین چند کیلووات تا ۱۰۰ مگاوات تولید توان داشته باشند. استفاده از تولید پراکنده مزایایی همچون افزایش قابلیت اطمینان، افزایش کیفیت توان، افزایش کارایی و راندمان سیستم و کاهش آلودگی محیط زیست را به همراه دارد.

با وجود اینکه رویکرد تولید پراکنده در حل مسائل زیست محیطی و اقتصادی سیستم‌های قدرت رایج کارآمد است، اما چگونگی کنترل تعداد زیادی از این واحدهای تولید پراکنده یکی از چالش‌های اساسی است که با آن روبه‌رو هستیم. بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده با چالش‌های دیگری همچون

عملکرد مستقل از شبکه یا عملکرد جزیره‌ای، حفاظت و پایداری نیز روبه‌رو می‌باشد. بنابراین باوجود اینکه استفاده از تولید پراکنده از لحاظ محیط زیست بسیار پاک و از دید فنی بسیار قابل اطمینان و کم هزینه باشد، با این حال چالش‌های ذکرشده باید حل شوند تا زمینه برای انرژی الکتریکی پایدار براساس تولید پراکنده در آینده فراهم شود. ریزشبکه یک راه‌حل موثر در راستای حل چالش‌های بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده است که می‌تواند گروهی از واحدهای DG، بارها و سیستم‌های ذخیره انرژی را در یک منطقه مشخص به هم متصل کند [۱-۳].

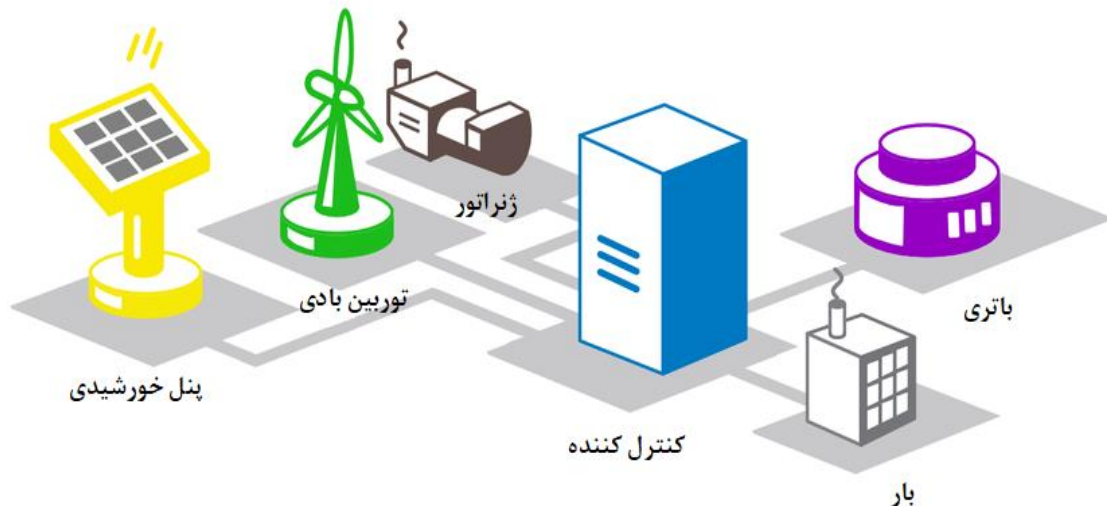
۲-۲ ریزشبکه

ریزشبکه یک سیستم قدرت کوچک است که منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی و بار را ادغام می‌کند تا این اجزاء در قالب یک سیستم واحد کار کنند. ریزشبکه‌ها می‌توانند هردو انرژی الکتریکی و حرارتی یک منطقه را فراهم کنند. در حالت عادی، ریزشبکه به شبکه سراسری متصل است اما می‌تواند در صورت بروز خطا در شبکه سراسری، به صورت جزیره‌ای به تغذیه بارهای محلی پردازد [۱-۳، ۱۰].

ریزشبکه‌ها نیز همانند سیستم‌های قدرت متداول می‌توانند به صورت AC و یا DC مورد بهره‌برداری قرار گیرند. در ابتدا ریزشبکه‌ها برای سازگاری بهتر با سیستم‌های قدرت متداول بیشتر به صورت جریان متناوب طراحی می‌شدند چراکه معمولاً سیستم‌های قدرت به دلیل مزایایی همچون انتقال توان و تبدیل ولتاژ آسان و همچنین انعطاف‌پذیری بالا در تغذیه بارهای مختلف بیشتر به صورت جریان متناوب مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. اما با تکامل سریع نیمه‌هادی‌ها و محصولات الکترونیک قدرت، سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی و ریزشبکه‌های جریان مستقیم بیشتر و بیشتر مورد توجه قرار گرفتند.

باوجود تمامی مزایای ریزشبکه‌های DC، این سیستم‌ها نیز با چالش‌هایی روبه‌رو هستند که به آن‌ها اشاره شد. برای بهره‌برداری از ریزشبکه‌های جریان مستقیم و برطرف کردن چالش‌های موجود، تحقیقات گسترده‌ای بر روی کنترل این سیستم‌ها انجام شده است. هدف از کنترل ریزشبکه DC در حقیقت

کنترل مبدل الکترونیک قدرت است که بارهای مختلف را تغذیه می‌کند، بنابراین نیاز است قبل از پرداختن به موضوع کنترل ریزشبه‌ها، مبدل‌های الکترونیک قدرت و بارهای موجود در ریزشبه‌ی جریان مستقیم مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.



شکل ۱-۲. ریزشبه، شامل منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی، واحد کنترل و بار

۳-۲ مبدل‌های DC به DC

مبدل‌های DC به DC مدارهای الکترونیک قدرتی هستند که یک ولتاژ DC را به یک ولتاژ DC با سطح متفاوت تبدیل می‌کنند و اغلب یک خروجی تنظیم شده را فراهم می‌آورند. در این پایان‌نامه، در محیط شبیه‌سازی و آزمایشگاه از مبدل افزایشنده^۱ استفاده شده است، بنابراین در ادامه تنها این نوع مبدل را بر اساس مرجع [۱۱] بررسی می‌شود.

۱-۳-۲ مبدل افزایشنده

مبدل افزایشنده، یکی از انواع مبدل‌های DC/DC است که با باز و بسته کردن متناوب کلید الکترونیکی کار می‌کند.

¹ Boost converter

از آنجایی که در این نوع مبدل ولتاژ خروجی همواره بزرگتر یا مساوی ولتاژ ورودی است، این مبدل افزایش‌ده نامیده می‌شود. در تحلیل مبدل‌های DC/DC فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱. اجزاء ایده‌آل هستند.

۲. دوره تناوب کلیدزنی T است و کلید برای مدت زمان DT بسته و برای مدت زمان $(1-DT)$ باز است. D نسبت وظیفه^۱ است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

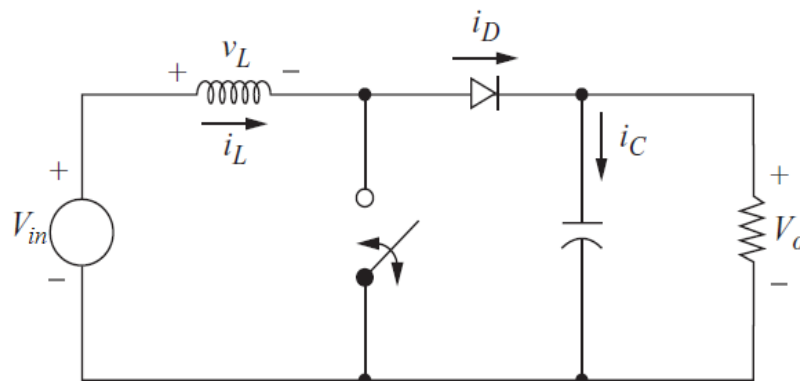
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} \cdot f \quad (۱-۲)$$

در رابطه فوق، t_{on} زمان وصل کلید، t_{off} زمان قطع کلید و f فرکانس کلیدزنی می‌باشد.

۳. جریان سلف متناوب و همیشه مثبت است.

۴. ولتاژ متوسط سلف صفر است.

۵. جریان متوسط خازن صفر است.



شکل ۲-۲. مبدل افزایش‌ده [۱۱]

تحلیل برای کلید بسته: هنگامی که کلید بسته است، دیود باز و طبق قانون کیرشهف حول مسیری که

شامل منبع، سلف و کلید بسته است، می‌توان نوشت:

$$V_L = V_{in} = L \frac{di_L}{dt} \quad (۲-۲)$$

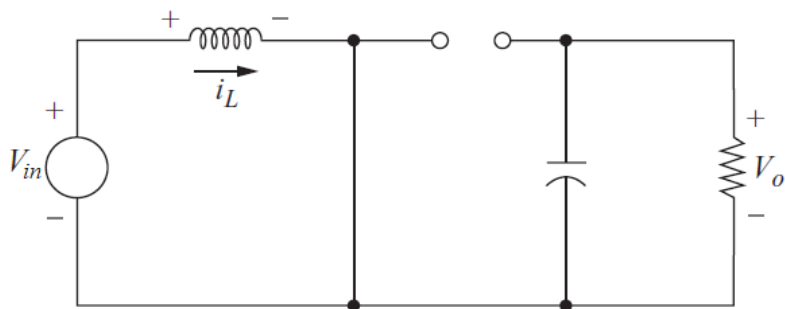
در رابطه فوق L مقدار سلف و تغییرات در جریان سلف از معادله زیر تعیین می‌شود:

¹ Duty cycle

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L} \quad (3-2)$$

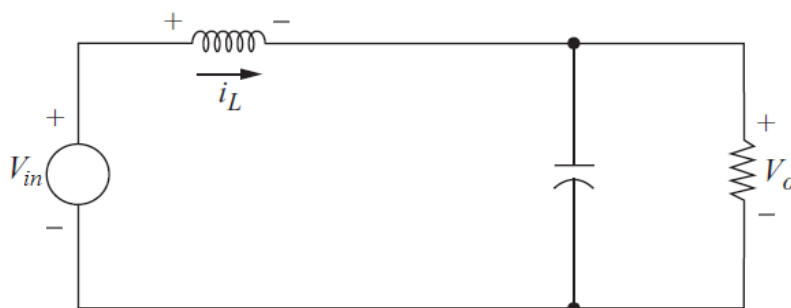
با حل معادله فوق بر حسب Δi_L ، برای کلید بسته می‌توان نوشت:

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_{in} \cdot DT}{L} \quad (4-2)$$



شکل ۳-۲. مدار معادل مبدل افزایشده برای کلید بسته [۱۱]

تحلیل برای کلید باز: هنگامی که کلید باز است جریان سلف نمی‌تواند تغییرات ناگهانی داشته باشد، بنابراین مسیر ورودی به خروجی از طریق دیود بسته می‌شود. با فرض اینکه ولتاژ خروجی V_o ثابت است، ولتاژ دو سر سلف برابر است با:



شکل ۴-۲. مدار معادل مبدل افزایشده برای کلید باز [۱۱]

$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (5-2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L}$$

میزان تغییرات جریان سلف ثابت است، بنابراین هنگامی که کلید باز است جریان باید به‌طور خطی

تغییر کند. در این حالت تغییرات جریان سلف را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (6-2)$$

با حل معادله فوق بر حسب Δi_L داریم:

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{(V_{in} - V_o)(1 - D)T}{L} \quad (7-2)$$

برای کار در حالت دائم، تغییرات در جریان سلف باید صفر باشد. بنابراین با استفاده از معادلات (۷-۲)

و (۴-۲)، داریم:

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \quad (8-2)$$

$$\frac{V_{in}DT}{L} + \frac{(V_{in} - V_o)(1 - D)T}{L} = 0$$

با حل معادله فوق بر حسب V_o داریم:

$$V_{in}(D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0 \quad (9-2)$$

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

معادله (۹-۲) نشان می‌دهد که اگر کلید همیشه باز و D صفر باشد، ولتاژ خروجی همان ولتاژ ورودی خواهد بود. با افزایش نسبت وظیفه، مخرج معادله (۹-۲) کوچکتر می‌شود و در نتیجه خروجی بزرگتر خواهد شد. مبدل افزایشده یک ولتاژ خروجی تولید می‌کند که بزرگتر یا مساوی با ولتاژ ورودی است. به هر حال ولتاژ خروجی نمی‌تواند کمتر از ورودی باشد.

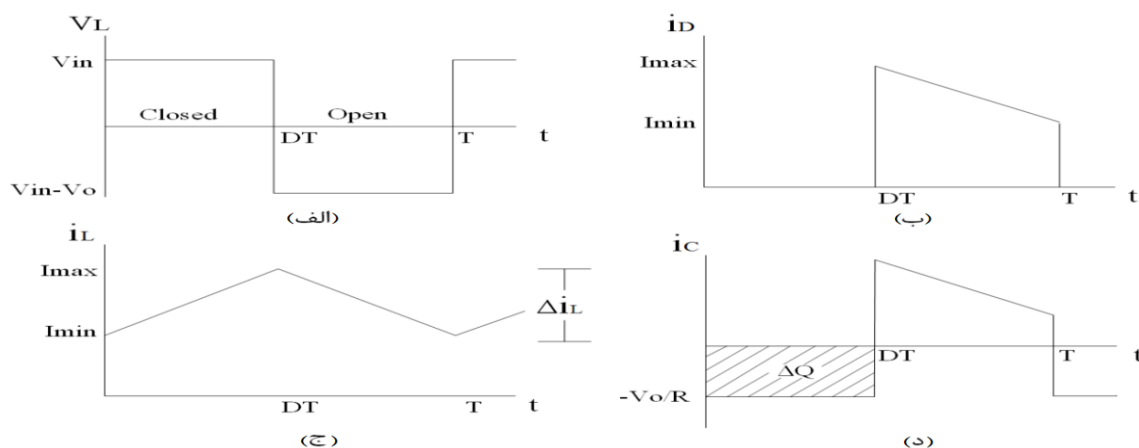
هنگامی که نسبت وظیفه به سمت ۱ برود، ولتاژ خروجی طبق معادله (۹-۲) به سمت بی‌نهایت می‌رود، اما به هر حال معادله (۹-۲) بر مبنای قطعات ایده‌آل است. قطعات واقعی تلفات دارند و از چنین اتفاقی جلوگیری می‌کنند.

شکل (۵-۲) شکل موج‌های ولتاژ و جریان را در مبدل افزایشده نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵-۲-ج)، چنانچه فرض شود حداقل جریان سلف برابر با صفر است، حداکثر جریان سلف در زمان وصل کلید را می‌توان به صورت رابطه (۱۲-۲) نمایش داد:

$$L \frac{di_L}{dt} = V_L \quad (10-2)$$

$$L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = L \frac{I_{max} - 0}{DT} = V_L \quad (۱۱-۲)$$

$$I_{max} = \frac{V_{in}}{L} DT \quad (۱۲-۲)$$



شکل ۲-۵. شکل موج‌های مبدل افزایشنده. الف) ولتاژ سلف؛ ب) جریان دیود؛ ج) جریان سلف؛ د) جریان خازن [۱۱]

با توجه به رابطه (۹-۲)، می‌توان رابطه (۱۲-۲) را برحسب ولتاژ خروجی به صورت زیر نوشت:

$$I_{max} = \frac{V_o}{L} D(1-D)T \quad (۱۳-۲)$$

براساس رابطه فوق، مقدار متوسط جریان سلف (I_{Lb}) برابر است با:

$$I_{Lb} = \frac{I_{max}}{2} = \frac{V_o}{2L} D(1-D)T \quad (۱۴-۲)$$

با توجه به رابطه (۱۴-۲) و نسبت تبدیل بدست آمده برای مبدل افزایشنده، می‌توان جریان متوسط

خروجی (I_{ob}) این مبدل را به صورت رابطه زیر نمایش داد:

$$I_{ob} = I_{Lb}(1-D) = \frac{V_o}{2L} D(1-D)^2 T \quad (۱۵-۲)$$

یک شرط ضروری برای اینکه جریان سلف پیوسته باشد این است که I_{min} مثبت باشد، بنابراین

$I_{min} = 0$ مرز بین جریان سلف پیوسته و ناپیوسته می‌باشد. چنانچه حداقل جریان سلف را برابر با

جریان متوسط سلف فرض کنیم، می‌توان با توجه به رابطه (۱۵-۲) مقدار حداقل سلف را برحسب

فرکانس کلیدزنی برای جریان پیوسته در مبدل افزایشنده به صورت زیر نوشت:

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (۱۶-۲)$$

یک مبدل افزایشدهنده که برای عملکرد جریان پیوسته طراحی شده است، باید دارای مقدار سلفی بزرگتر از L_{min} باشد.

۲-۳-۱-۱ رپیل ولتاژ خروجی

معادلات قبل بر اساس این فرض که ولتاژ خروجی ثابت و خازن بی‌نهایت است، به دست آمد. در عمل مقدار محدود خازن منجر به نوساناتی در ولتاژ خروجی یا همان رپیل خواهد شد.

با توجه به شکل (۲-۵-۵)، تغییرات در بار خازن (ΔQ) را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$\Delta Q = C \Delta V_o = \left(\frac{V_o}{R} \right) DT = I_o DT \quad (۱۷-۲)$$

در رابطه فوق C مقدار خازن است. با توجه به رابطه (۲-۱۷) می‌توان نوشت:

$$C = \frac{I_o DT}{\Delta V_o} \quad (۱۸-۲)$$

با ضرب صورت و مخرج رابطه فوق در V_o می‌توان یک رابطه برای ظرفیت بر حسب رپیل ولتاژ خروجی و فرکانس کلیدزنی نوشت:

$$C = \frac{\frac{I_o}{V_o} DT}{\frac{\Delta V_o}{V_o}} = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f} \quad (۱۹-۲)$$

۲-۴ انواع مدل بار در ریزشبه‌های DC

بار در ریزشبه DC به سه نوع مقاومت ثابت^۱، جریان ثابت^۲ و توان ثابت^۳ تقسیم‌بندی می‌شود، بنابراین می‌توان رابطه کلی برای توان بار را به صورت رابطه زیر در نظر گرفت [۱۲]:

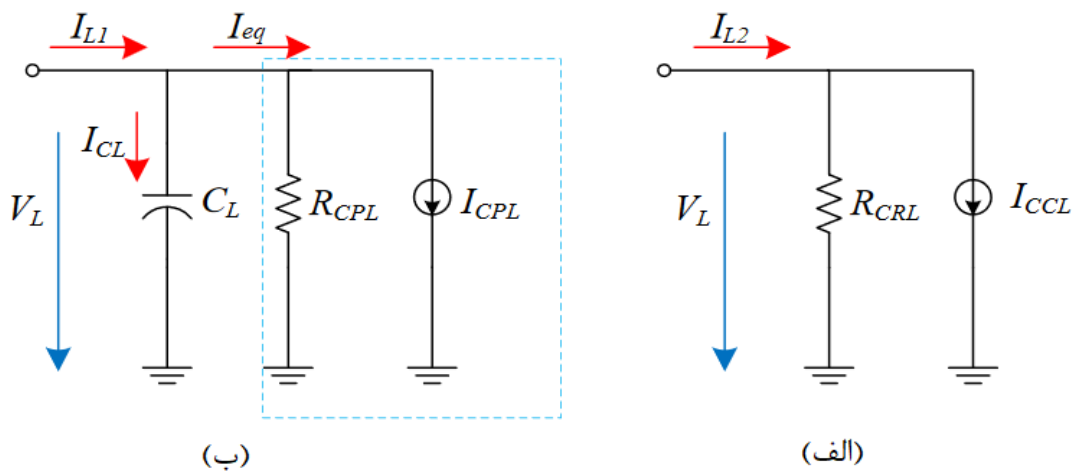
$$P_L = P_{CRL} + P_{CCL} + P_{CPL} \quad (۲۰-۲)$$

^۱ Constant resistance load

^۲ Constant current load

^۳ Constant power load

در رابطه (۲۰-۲) توان بار مقاومت ثابت، P_{CCL} توان بار جریان ثابت و P_{CPL} توان بار مقاومت ثابت می‌باشند. شکل (۲-۶-الف) مدار معادل بار مقاومت ثابت و جریان ثابت و شکل (۲-۶-ب) مدار معادل بار توان ثابت را نشان می‌دهند. در شکل زیر V_L ولتاژ بار، C_L ظرفیت معادل بار توان ثابت، R_{CPL} مقاومت معادل بار توان ثابت، R_{CRL} مقاومت بار مقاومت ثابت، I_{CPL} جریان معادل بار توان ثابت و I_{CCL} جریان بار جریان ثابت هستند.



شکل ۲-۶. انواع مدل بار در ریز شبکه DC

۲-۴-۱ بار مقاومت ثابت

لامپ‌های رشته‌ای و اجاق‌های برقی نمونه‌هایی از بار مقاومت ثابت هستند. جریان بار برای بارهای مقاومت ثابت (I_{CRL}) به صورت رابطه (۲۱-۲) می‌باشد و مقدار آن می‌تواند با تغییر ولتاژ تغییر کند.

$$I_{CRL} = \frac{V_L}{R_{CRL}} \quad (۲۱-۲)$$

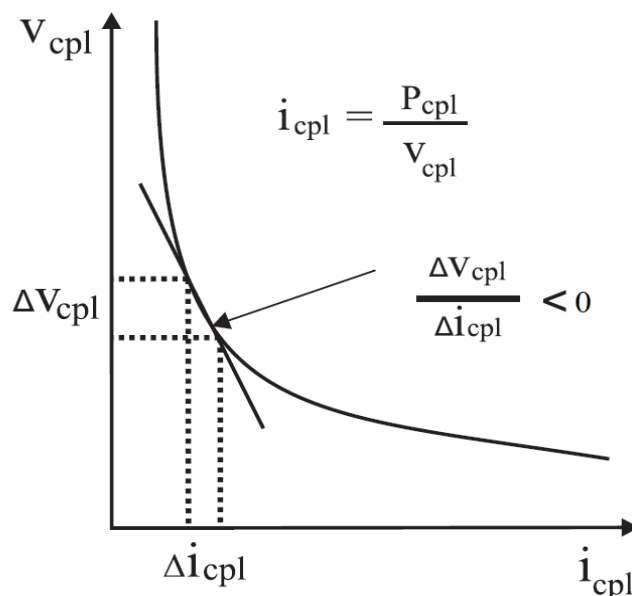
۲-۴-۲ بار جریان ثابت

مقاومت داخلی بارهای جریان ثابت با توجه به تغییرات ولتاژ تغییر می‌کند تا همواره یک جریان تقریباً ثابت فراهم شود، در این حالت توان متغیر خواهد بود. لامپ‌های LED و شارژرهای باتری از انواع رایج بارهای جریان ثابت هستند. جریان در این مدل بار به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$I_{CCL} = I_{Constant} = \frac{P_{CCL}}{V_L} \quad (22-2)$$

۳-۴-۲ بار توان ثابت

اتصال مستقیم بار از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به باس DC می‌تواند منجر به ناپایداری و سیستم قدرت را با چالش روبه‌رو کند. از دید باس DC، مبدل‌ها رفتاری شبیه به بار توان ثابت از خود نشان می‌دهند چرا که تمایل دارند توان بار متصل به خود را حتی با وجود نوسانات ولتاژ و جریان، ثابت نگه دارند. در نهایت این کنترل شدید مبدل‌ها، اثر مقاومت افزایشی منفی ایجاد می‌کند و این میرایی منفی می‌تواند در شرایط خاص منجر به ناپایداری ولتاژ در باس DC شود. شکل (۷-۲) مشخصه $v-i$ بار توان ثابت و مقاومت افزایشی منفی را نشان می‌دهد. کامپیوترها و موتورهای الکتریکی متصل به مبدل‌ها از انواع بارهای توان ثابت هستند [۱۳، ۱۴].



شکل ۷-۲. مشخصه $v-i$ بار توان ثابت و مقاومت افزایشی منفی [۱۴]

جریان معادل جذب‌شده توسط بار توان ثابت به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$I_{eq} \approx I_{CPL} + \frac{V_L}{R_{CPL}} \quad (23-2)$$

۲-۵ کنترل ریزش شبکه DC

به منظور عملکرد صحیح و تضمین قابلیت اطمینان یک ریزش شبکه DC، باید روش‌های کنترلی به‌طور موثر اجرا شوند. هدف از کنترل ریزش شبکه DC، کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت است چرا که این مبدل‌ها نقش کلیدی در عملکرد یک ریزش شبکه DC ایفا می‌کنند. مبدل‌ها نه تنها عملکرد موثر محلی را تضمین می‌کنند، بلکه اتصال هماهنگ بین واحدهای مختلف تولید پراکنده را فراهم می‌کنند. البته ثابت شده است که یک مبدل الکترونیک قدرت همچون بارها اثر غیرخطی به سیستم اعمال می‌کنند و این ناشی از رفتار توان ثابت آن‌ها است که می‌تواند سیستم را ناپایدار سازد. بنابراین این موضوع نیز باید در استراتژی‌های کنترلی در نظر گرفته شود.

۲-۵-۱ اهداف کنترل ریزش شبکه DC

افزایش استفاده از واحدهای تولید پراکنده و در نتیجه مبدل‌ها و همچنین بارهای غیرخطی، طراحی کنترل‌کننده را مهم و قابل توجه ساخته است. مهمترین اهداف کنترلی یک ریزش شبکه DC عبارتند از [۱۵-۱۸]:

۱. کنترل موثر ولتاژ و جریان در هر دو حالت عملکرد متصل به شبکه و جزیره‌ای

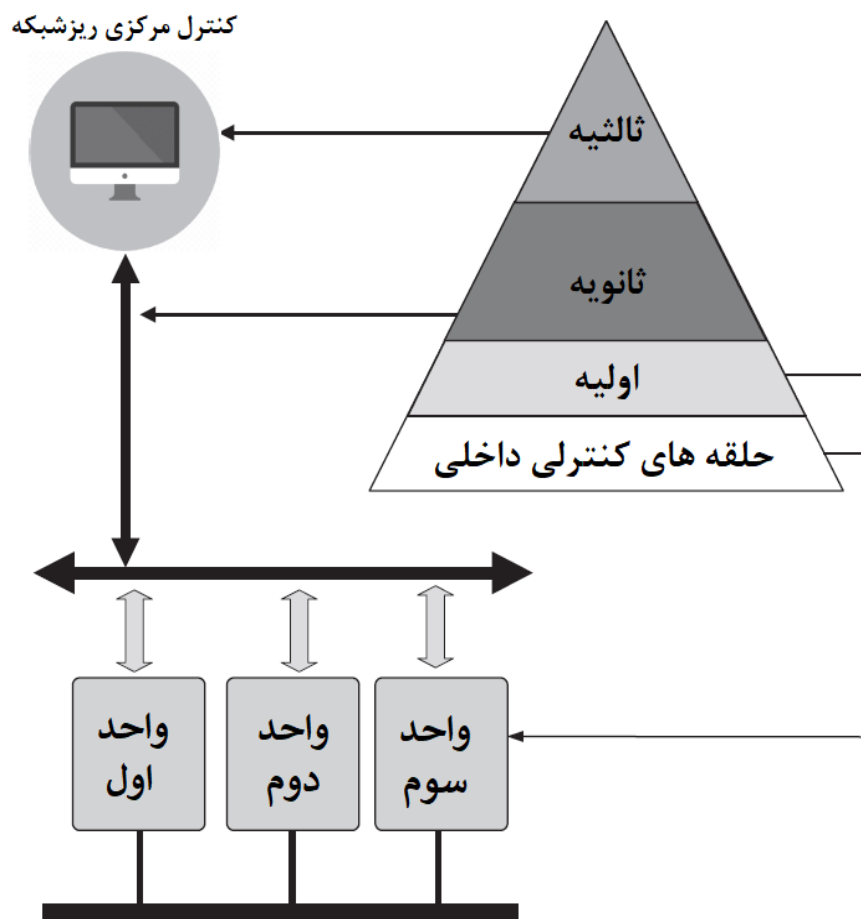
۲. عملکرد پایدار سیستم با انواع بار (اهمی و توان ثابت)

۳. تقسیم بار مناسب بین واحدها

۲-۵-۲ روش‌های کنترلی در ریزش شبکه DC

کنترل ریزش شبکه‌های DC طیف گسترده‌ای از اهداف کنترلی را پوشش می‌دهد. بنابراین برای درک بهتر مفهوم و اجرای کنترل ریزش شبکه، دسته‌بندی روش‌های کنترلی به زیرسطوح مستقل، ضروری است.

به این دسته‌بندی، ساختار کنترل سلسله‌مراتبی گویند که در شکل (۸-۲) نمایش داده شده است. در ساختار سلسله‌مراتبی، معمولاً سیستم کنترلی ریزشبکه در دو یا سه سطح اجرا می‌شود که در هر سطح، یکی از روش‌های کنترل متمرکز، غیرمتمرکز و یا توزیع‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].



شکل ۸-۲. ساختار کنترل سلسله‌مراتبی یک ریزشبکه [۲]

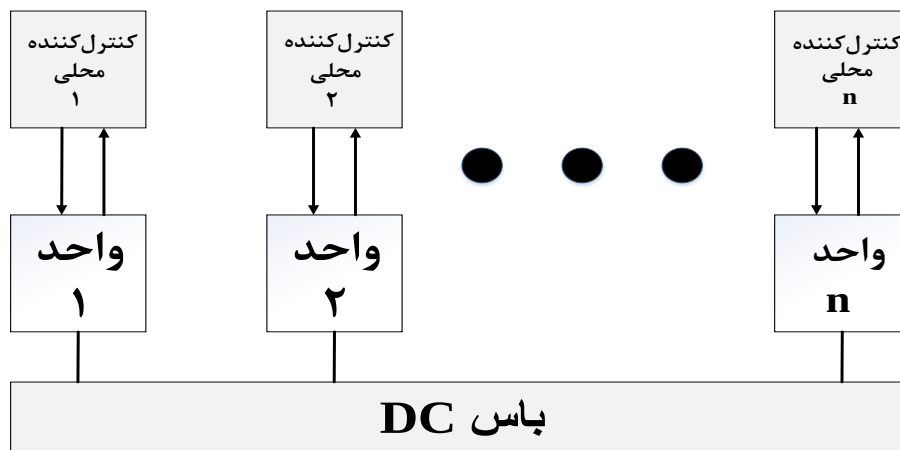
۲-۵-۱ کنترل اولیه

به‌طور کلی وظیفه کنترل اولیه تقسیم بار مناسب بین واحدهای تولید پراکنده است. در این سطح معمولاً از روش کنترل غیرمتمرکز استفاده می‌شود چرا که در ریزشبکه‌های بزرگ که واحدهای تولید پراکنده با فاصله زیاد از یکدیگر قرار گرفته‌اند، اتصال ارتباطی در سطح کنترل اولیه امکان‌پذیر نیست و تنها

اطلاعات ولتاژ و جریان محلی در دسترس است. کنترل افقی به عنوان یک روش غیرمتمرکز محبوب‌ترین گزینه در این سطح کنترلی است. کنترل افقی در ریزشبکه‌های DC را می‌توان همچون مقاومت مجازی در نظر گرفت [۱۹، ۲۰].

۲-۵-۲-۱-۱ کنترل غیرمتمرکز

هیچ اتصال ارتباطی در این روش کنترلی وجود ندارد. تمام واحدها با کنترل کننده‌های مستقل و از طریق متغیرهای محلی کنترل می‌شوند. این روش به دلیل عدم حضور اتصال ارتباطی قابلیت اطمینان و انعطاف پذیری بالایی دارد اما با معایبی همچون وابستگی به بار، کارکرد نامناسب با بارهای غیرخطی، عملکرد گذرا ضعیف و تقسیم بار ضمن ایجاد انحراف ولتاژ نیز روبه‌رو است [۲۱].



شکل ۲-۹. روش کنترل غیرمتمرکز

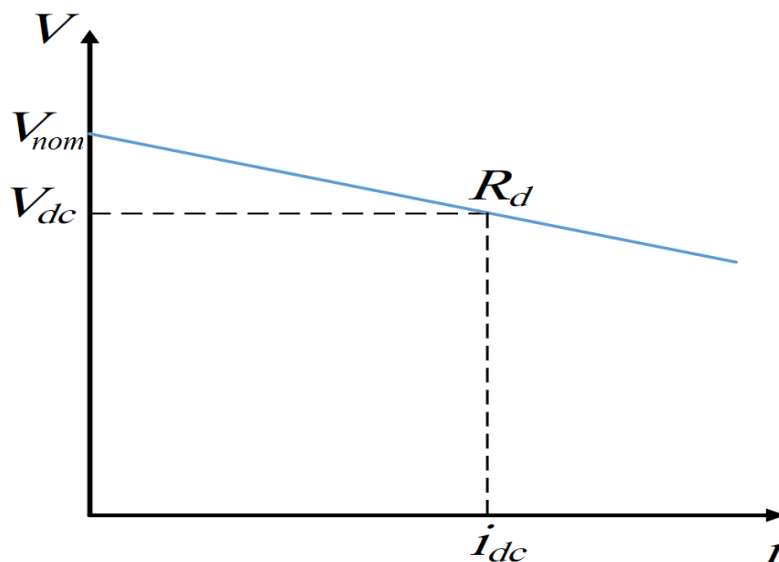
۲-۵-۲-۱-۱-۱ کنترل افقی

ایده اصلی کنترل افقی از ژنراتورهای AC موجود در شبکه فعلی گرفته شده است. در سیستم کنترل ژنراتورهای AC تولید توان به وسیله محرک‌های مکانیکی کنترل می‌شود. به‌طورمثال گاورنر تغییرات سرعت ژنراتور سنکرون (فرکانس) را اندازه‌گیری می‌کند و تنظیم توان را با توجه به مشخصه افقی ژنراتور

فراهم می‌کند. با استفاده از چنین مشخصه‌هایی، ژنراتورهای سنکرون در باس AC می‌توانند با توجه به تغییرات بار به تغییرات فرکانس و ولتاژ پاسخ دهند [۲۲]. چنین مفهومی می‌تواند برای تقسیم توان در مبدل‌های DC موازی مورد استفاده قرار گیرد. در ریزشبه‌های DC توان راکتیو وجود ندارد و توان اکتیو نیز تنها به وسیله ولتاژ DC ترمینال مبدل کنترل می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در ریزشبه‌های DC کنترل اف‌تی، افت ولتاژ مجازی برای هر واحد DG را تعیین می‌کند.

با توجه به شکل (۲-۱۰)، ارتباط بین ولتاژ و جریان DC را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد:

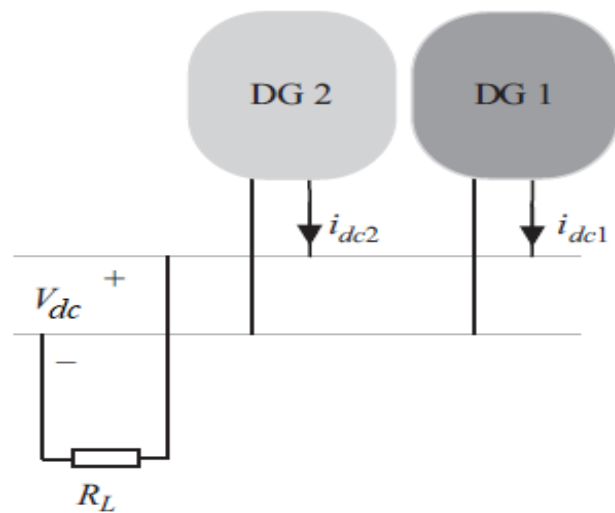
$$V_{dc} = V_{nom} - R_d i_{dc} \quad (2-24)$$



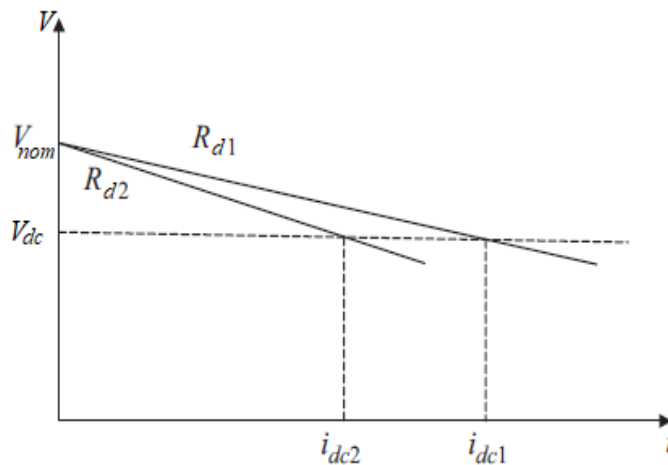
شکل ۲-۱۰. مشخصه اف‌تی v-i

در رابطه فوق i_{dc} جریان خروجی مبدل، V_{nom} ولتاژ نامی، V_{dc} ولتاژ ترمینال و R_d ضریب اف‌تی می‌باشد که R_d را می‌توان به عنوان مقاومت مجازی نیز در نظر گرفت.

برای بررسی مفهوم تقسیم توان با استفاده از کنترل اف‌تی یک سیستم ریزشبه DC در نظر گرفته شده است که این سیستم در شکل (۲-۱۱) و مشخصه‌های اف‌تی واحدهای آن نیز در شکل (۲-۱۲) قابل مشاهده می‌باشند.



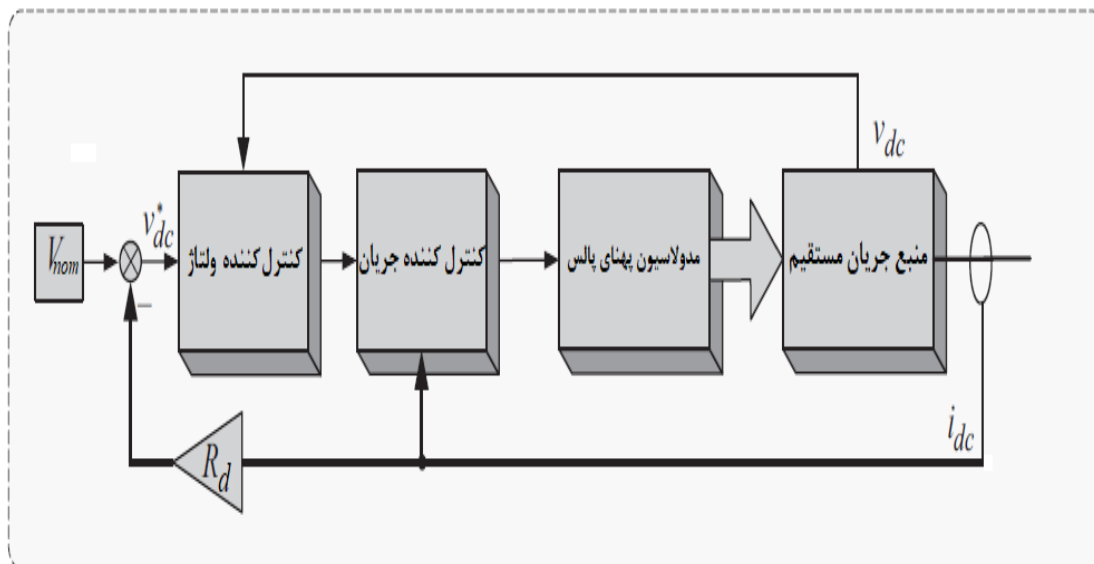
شکل ۱۱-۲. یک ریز شبکه با دو واحد تولید پراکنده [۲]



شکل ۱۲-۲. مشخصه‌های افتی واحدهای DG ریز شبکه [۲]

در هر واحد تولید پراکنده جریان خروجی پس از اندازه‌گیری، در ضریب افتی ضرب می‌شود و مقدار افت ولتاژ مجازی بدست می‌آید، ضریب افتی هر واحد بر اساس توان نامی همان واحد DG طراحی شده است. مقدار افت ولتاژ مجازی بدست آمده، از ولتاژ نامی کم می‌شود و مقدار نهایی به کنترل‌کننده ولتاژ اعمال می‌شود. چنانچه مقدار ورودی به کنترل‌کننده ولتاژ از مقدار ولتاژ در نظر گرفته شده در هنگام طراحی ضریب افتی کمتر یا بیشتر باشد، این کنترل‌کننده با خروجی خود سعی بر بازیابی ولتاژ خواهد کرد. در حقیقت همین روند منجر به تقسیم بار بین واحدها خواهد شد.

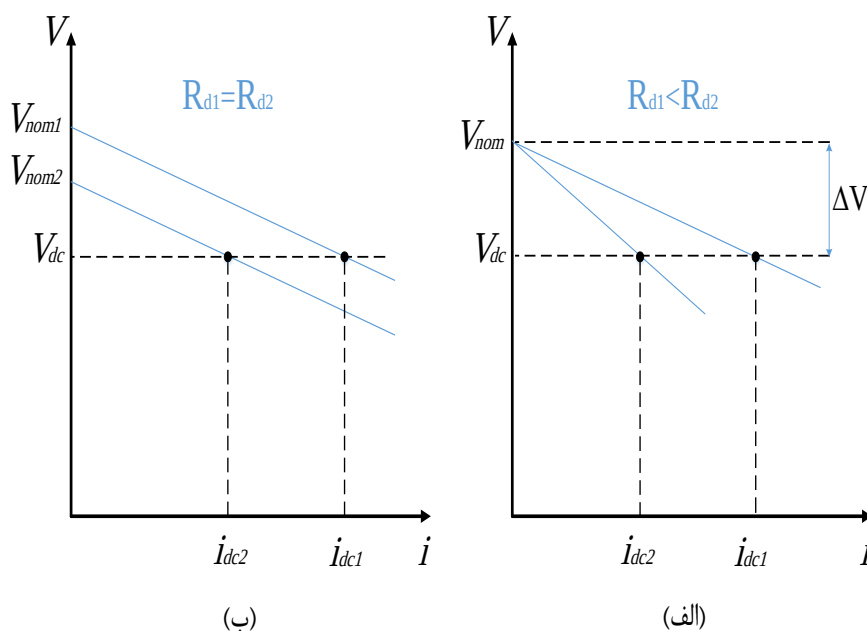
کلیه محاسبات و مراحل اجرای کنترل اولیه یک واحد DG در ریزشبه، در شکل (۲-۱۳) قابل مشاهده است.



شکل ۲-۱۳. کنترل اولیه یک ریزشبه DC با استفاده از کنترل افی [۲]

در هنگام طراحی مشخصه افی برای واحدهای تولید پراکنده که به صورت موازی در یک ریزشبه کار می‌کنند، باید به دو نکته توجه کرد. نکته اول اینکه در زمان طراحی مشخصه افی باید به مقدار ضریب افی واحدها توجه شود تا یک تعادل نسبی بین تقسیم بار و تنظیم ولتاژ خروجی برقرار شود. همان‌طور که در شکل (۲-۱۴ الف) مشاهده می‌شود، واحدی که دارای ضریب افی بزرگتر است، در تغذیه بار سهم کمتری خواهد داشت اما این انتخاب منجر به افزایش انحراف ولتاژ خواهد شد. از طرف دیگر واحدی که دارای ضریب افی کوچکتر است، در تغذیه بار سهم بیشتری خواهد داشت اما با انحراف ولتاژ کمتری روبه‌رو خواهد شد.

نکته دوم که باید مورد توجه قرار گیرد، مقدار ولتاژ نامی واحدها است. در هنگام طراحی مشخصه افی واحدها، هر واحدی که ولتاژ نامی آن بیشتر در نظر گرفته شود، در تقسیم بار سهم بیشتری خواهد داشت. این موضوع در شکل (۲-۱۴ ب) قابل مشاهده است.



شکل ۲-۱۴. بررسی تغییرات مشخصه افتی. (الف) تغییرات ضریب افتی (ب) تغییرات ولتاژ نامی [۱۹]

در استفاده از کنترل افتی به عنوان کنترل اولیه ممکن است در زمان عملکرد سیستم، به دو دلیل در تقسیم توان خطا رخ دهد.

۱. خطا در کنترل ولتاژ:

در شرایط عملکرد واقعی سیستم، ممکن است به دلیل خطای اندازه‌گیری سنسورهای ولتاژ و جریان، ولتاژ خروجی هر واحد تولید پراکنده متفاوت باشد، حتی اگر ولتاژهای مرجع یکسان در نظر گرفته شده باشند. این خطا در تنظیم ولتاژ واحدهای DG می‌تواند منجر به خطای تقسیم توان شود.

۲. امپدانس خط انتقال:

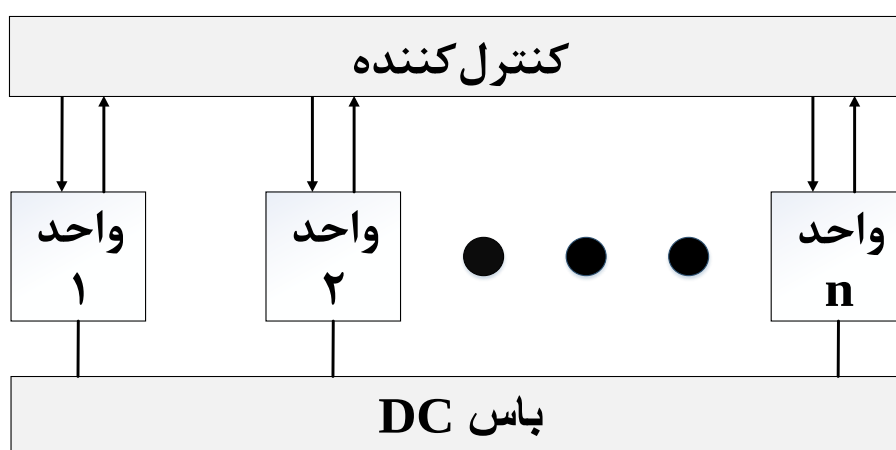
در ریزشبکه‌های DC با مقیاس بزرگ، ولتاژهای خروجی واحدهای DG می‌توانند به دلیل امپدانس‌های خط نابرابر، متفاوت باشند و این اختلاف منجر به خطا در تقسیم توان خواهد شد. بنابراین در سیستم‌های با مقیاس بزرگ، نمی‌توان از امپدانس‌های خط صرف‌نظر کرد چرا که تقسیم بار بین واحدهای تولید پراکنده به امپدانس‌های خط وابسته است و با چشم‌پوشی از آن‌ها تقسیم توان بین چند واحد تولید پراکنده متناسب با توان نامی آن‌ها صورت نمی‌گیرد.

۲-۵-۲ کنترل ثانویه

هدف از اجرای کنترل ثانویه بازیابی انحراف ولتاژ ایجاد شده در باس DC ناشی از کنترل افتی اولیه و همچنین بهبود تقسیم بار می‌باشد. هنگامی که ریز شبکه به شبکه اصلی متصل است، کنترل ثانویه از کنترل ثالثیه یا کنترل درجه سوم فرمان می‌گیرد اما کنترل ثانویه می‌تواند به صورت محلی و در داخل واحد تولید پراکنده نیز اجرا شود. چنانچه کنترل ثانویه با کنترل ثالثیه ادغام شود، نوع کنترل‌کننده متمرکز و چنانچه کنترل ثانویه به صورت محلی و در داخل واحد DG اجرا شود، نوع کنترل‌کننده توزیع‌شده خواهد بود [۲۳-۲۵].

۲-۵-۲-۱ کنترل متمرکز

در روش کنترل متمرکز از یک کنترل‌کننده مرکزی برای تمامی واحدها استفاده می‌شود. اطلاعات از واحدهای مختلف ریز شبکه جمع‌آوری و پردازش می‌شوند و فرمان از طریق سیستم ارتباطی موجود به واحدها اعمال می‌شود. از مزایای این روش رویت‌پذیری و کنترل‌پذیری تمام سیستم است و معایب آن قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری پایین و شکست نقطه تکی^۱ می‌باشند [۲۱].

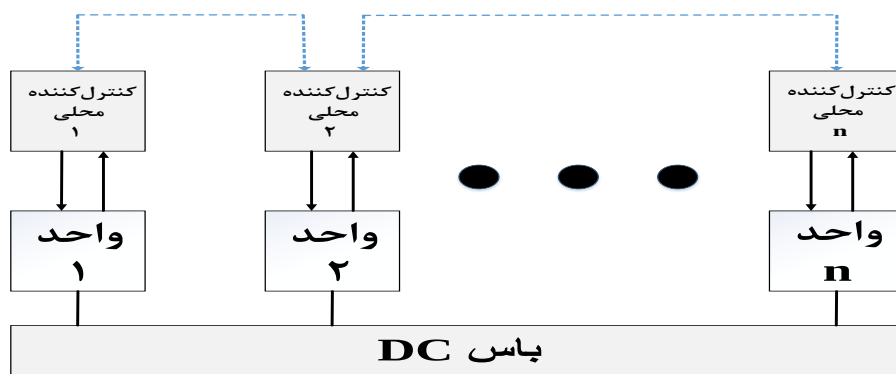


شکل ۲-۱۵. روش کنترل متمرکز

¹ Single point of failure

۲-۵-۲-۲-۲ کنترل توزیع شده

این طرح مزایای دو روش قبل را باهم دارد. در این روش کنترل کننده هر واحد با همسایگان خود از طریق اتصال ارتباطی تبادل اطلاعات دارد، بنابراین اهداف تقسیم توان بار، بازیابی ولتاژ و تعادل سطح شارژ باتری به راحتی انجام می‌شوند. با تمام این مزایا این روش نیز بامعایبی همچون انحراف ولتاژ، خطای ردیابی توان و پیچیدگی عملکرد تحلیلی روبه‌رو است [۲۱].

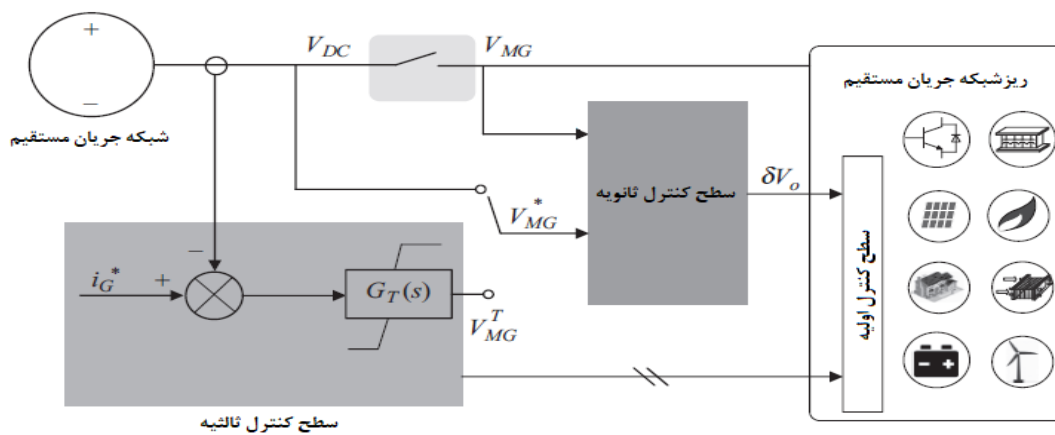


شکل ۲-۱۶. روش کنترل توزیع شده

۲-۵-۲-۳ کنترل ثالثیه

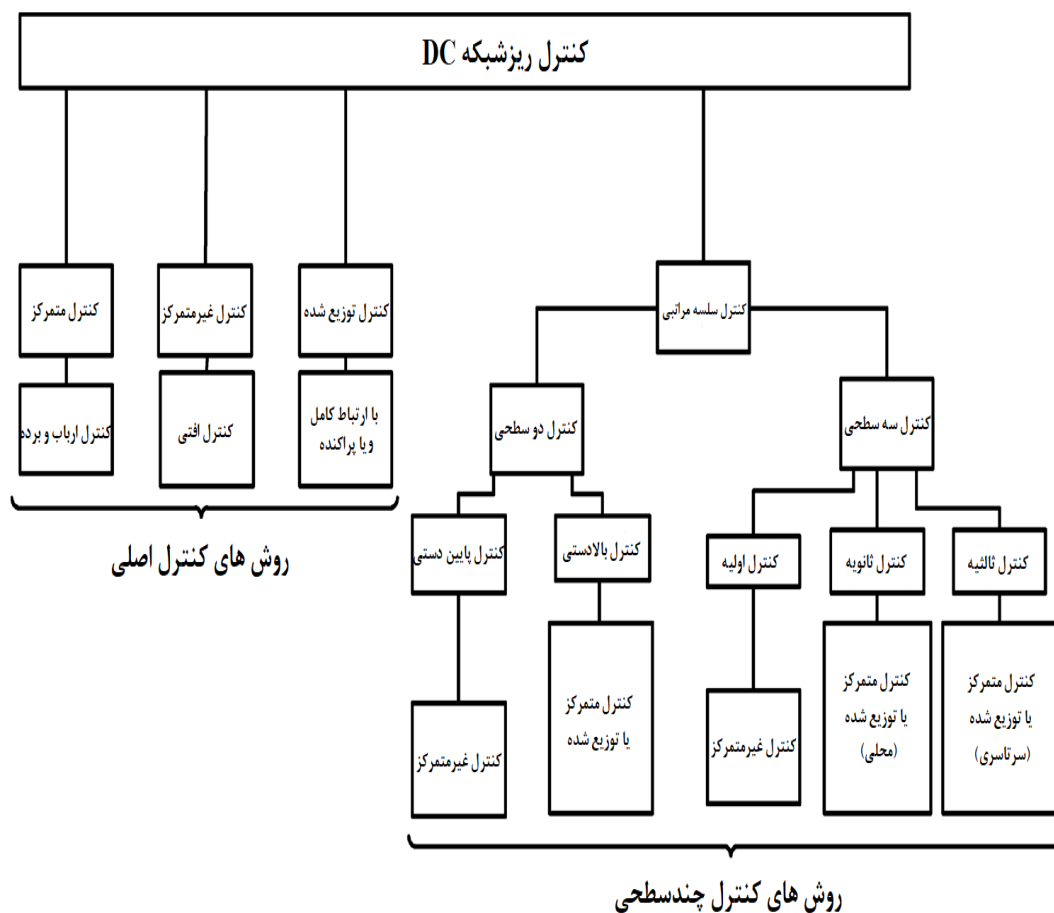
در زمان اتصال ریزشبه DC به شبکه فوقانی، باید یک فرایند همگام‌سازی بین ولتاژ ریزشبه و شبکه بالادستی اجرا شود. همان‌طور که در شکل (۲-۱۷) مشاهده می‌شود، زمانی که انحراف بین ولتاژ ریزشبه و شبکه فوقانی از مقدار مشخص شده کمتر و به مقدار قابل قبول برسد، کنترل ثالثیه یک سیگنال برای روشن کردن سوئیچ ارسال خواهد کرد. در این زمان کنترل ثالثیه ولتاژ مرجع کنترل ثانویه را از ولتاژ V_{MG}^* به V_{MG}^T تغییر خواهد داد [۲].

به‌طور کل می‌توان گفت این سطح کنترلی مسئول مدیریت توان بین ریزشبه و شبکه‌های فوقانی می‌باشد. همچنین کنترل ثالثیه برنامه‌ریزی داخلی ریزشبه برای دستیابی به عملکرد بهینه را انجام می‌دهد.



شکل ۲-۱۷. کنترل ثالثیه برای مدیریت تبادل توان بین ریزشبکه و شبکه بالادستی [۲]

شکل (۲-۱۸) کلیه روش‌های کنترلی مورد استفاده در ریزشبکه DC که در این فصل به آن‌ها پرداخته شد را به‌طور کامل نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۸. روش‌های کنترلی ریزشبکه DC [۲۱]

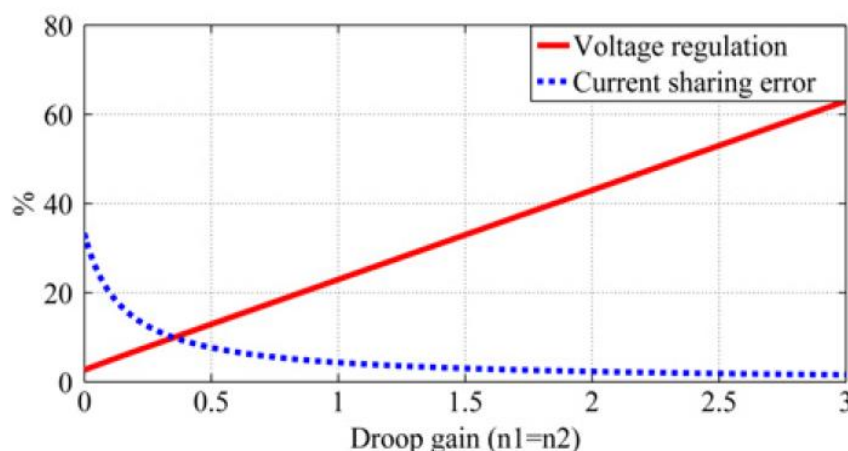
۲-۶ جمع‌بندی:

در این فصل مفاهیم اصلی و اجزا مهم ریزشبکه DC معرفی و پس از آن، ساختار کنترل سلسه‌مراتبی به صورت کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین در این فصل محدودیت‌های کنترل افقی که یک روش پرکاربرد است مورد بررسی قرار گرفت و روش کنترل توزیع‌شده به عنوان یک روش مناسب برای رفع محدودیت‌های کنترل افقی معرفی شد. در فصل بعد تحقیقات اخیر انجام شده در زمینه کنترل ثانویه و بکارگیری روش کنترل توزیع شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

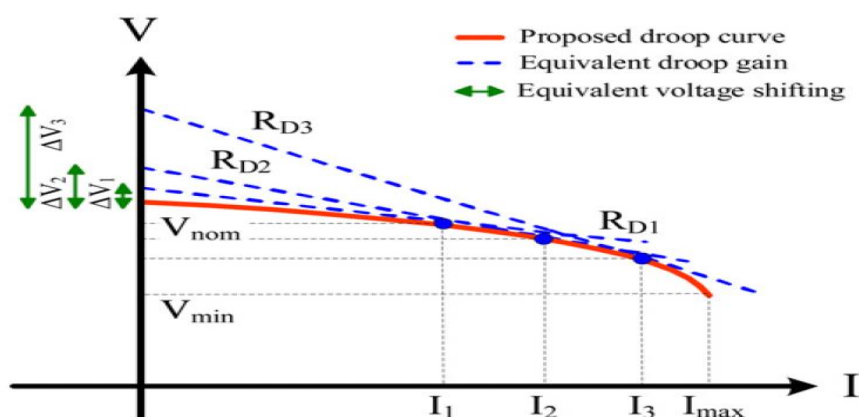
فصل ۳ : مروری بر کارهای انجام شده در زمینه کنترل توزیع شده در زیر شبکه DC

۱-۳ مقدمه

کنترل ریزش‌بکه DC به صورت دو و یا سه سطحی و در قالب سیستم کنترل سلسله‌مراتبی اجرا می‌شود که در فصل قبل به آن‌ها اشاره شد. یکی از مهم‌ترین اهداف کنترلی در ریزش‌بکه DC، تقسیم بار صحیح بین واحدهای تولید پراکنده است. برای دستیابی به این هدف، معمولاً از کنترل افتی در سطح کنترل اولیه استفاده می‌شود. سادگی و عدم نیاز به سیستم ارتباطی از مزایای اجرای روش کنترل افتی می‌باشد. در این روش تقسیم بار صحیح بین واحدهای DG با ایجاد افت ولتاژ مجازی برای هر واحد تولید پراکنده انجام می‌شود که مقدار آن وابسته به جریان خروجی و مقدار ضریب افتی است. بنابراین مقدار ضریب افتی باید با توجه به ظرفیت هر واحد و با دقت انتخاب شود. همان‌طور که در شکل (۱-۳) مشاهده می‌شود، انتخاب ضریب افتی بزرگ منجر به کاهش خطای تقسیم جریان و همچنین افزایش انحراف ولتاژ می‌شود، از طرف دیگر ضریب افتی کوچک انحراف ولتاژ را کاهش می‌دهد اما منجر به افزایش خطا در تقسیم جریان می‌شود. بنابراین برقراری تعادل بین تنظیم ولتاژ و تقسیم بار یکی از چالش‌های انتخاب ضریب افتی است. استفاده از روش کنترل افتی تطبیقی (غیرخطی) یکی از راه‌حل‌های موجود برای مقابله با چالش‌های کنترل افتی متداول است که همچون روش‌های کنترل توزیع‌شده و متمرکز در سطح کنترل ثانویه نیازی به برقراری سیستم ارتباطی ندارد.



شکل ۱-۳. تاثیر افزایش مقدار ضریب افتی بر خطای تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ [۲۶]



شکل ۳-۲. مشخصه‌های اف‌تی روش پیشنهادی در مرجع [۲۶]

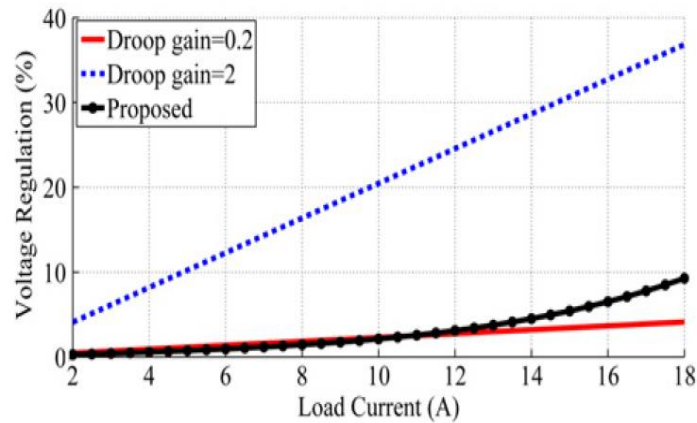
ضریب منحنی اف‌تی (α) را می‌توان با توجه به دقت در تقسیم جریان قابل قبول در بارگذاری سنگین مشخص کرد که مقدار آن را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\alpha = \frac{R_{D,i}^{max} I_{max,i}}{V_{nom} - V_{min}} \quad (3-4)$$

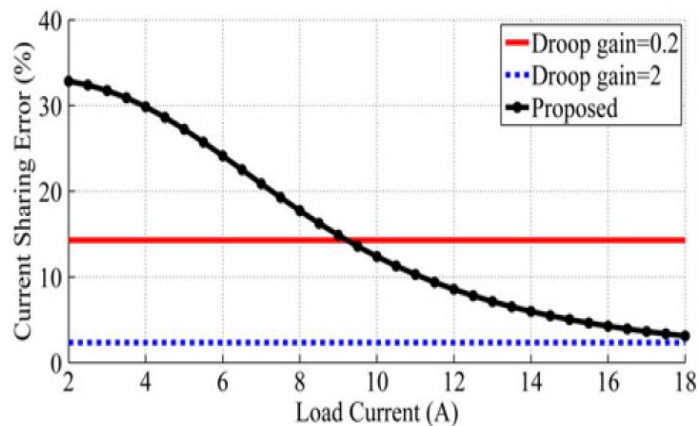
در شکل (۳-۳) نتایج حاصل از بررسی درصد تنظیم ولتاژ و خطای تقسیم جریان برای سه حالت ضریب اف‌تی کوچک، بزرگ و همچنین ضریب اف‌تی تطبیقی (غیرخطی) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳-۳ الف) مشاهده می‌شود، درصد تنظیم ولتاژ به ازاء ضریب اف‌تی کوچک (۰/۲) و تغییرات جریان بار همواره مقداری قابل قبول دارد اما با افزایش مقدار ضریب اف‌تی از ۰/۲ به ۲ مقدار آن به شدت افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۳-۳ الف) می‌توان گفت که درصد تنظیم ولتاژ در زمان استفاده از روش کنترل اف‌تی پیشنهادی در مرجع [۲۶]، به ازاء جریان‌های بار مختلف مقداری قابل قبول دارد.

همان‌طور که در شکل (۳-۳ ب) مشاهده می‌شود، مقدار خطای تقسیم جریان به ازاء ضریب اف‌تی کوچک (۰/۲) و تغییرات جریان بار همواره در حدود ۱۵٪ است. از طرف دیگر در زمان بکارگیری ضریب اف‌تی بزرگ (۲)، سیستم با خطای تقسیم جریان حدود ۲٪ مواجه است که مقداری قابل قبول است. برخلاف دو حالت قبل که در طول آزمایش مقدار خطای تقسیم جریان ثابتی دارند، روش کنترل اف‌تی تطبیقی (غیرخطی) پیشنهادی در مرجع [۲۶] در بارگذاری سبک با خطای تقسیم جریان بیشتر از ۳۰٪

روبه‌رو است که این مقدار در بارگذاری سنگین به حدود ۲٪ کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده وابستگی روش پیشنهادی به جریان بار است.



(الف)

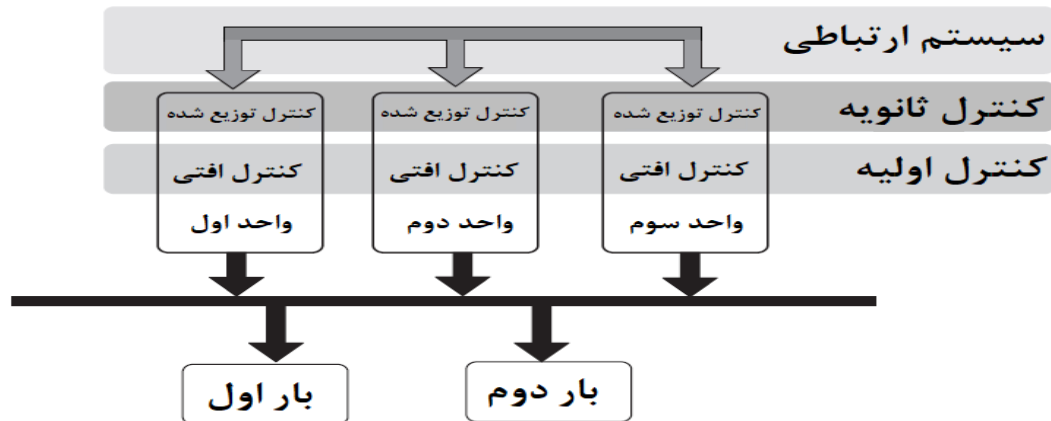


(ب)

شکل ۳-۳. مقایسه عملکرد روش پیشنهادی در مرجع [۲۶] با روش کنترل افتی متداول

روش پیشنهادی در مرجع [۲۶] تنها می‌تواند یک تعادل نسبی بین تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ برقرار کند که این عملکرد وابسته به بار است. بعلاوه عملکرد روش پیشنهادی در این مرجع در حالت گذرا ضعیف است. با توجه به معایب کنترل غیرمتمرکز، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از کنترل‌کننده ثانویه و برقراری یک سیستم ارتباطی با پهنای باند کم بین واحدهای DG یک ریزشکه DC ضروری است. هدف از اجرای کنترل ثانویه بازیابی انحراف ولتاژ ایجاد شده در باس DC و همچنین افزایش دقت در تقسیم بار بین واحدهای تولید پراکنده می‌باشد.

در شکل (۳-۴) نحوه اجرا سیستم کنترلی یک ریزشبکه DC شامل کنترل اولیه غیرمتمرکز (افتی) و کنترل ثانویه (توزیع شده) نشان داده شده است.



شکل ۳-۴. کنترل اولیه غیرمتمرکز و کنترل ثانویه توزیع شده در یک ریزشبکه DC [۲]

۳-۲ سیستم ارتباطی

در سطح کنترل ثانویه از دو روش کنترل متمرکز و توزیع شده استفاده می‌شود. روش کنترل متمرکز از قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری کمی برخوردار است، چرا که در این روش از یک کنترل‌کننده مرکزی برای تمامی واحدها استفاده می‌شود. بنابراین بهتر است از روش کنترل توزیع شده در جهت افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان ریزشبکه DC استفاده شود. در کنترل ثانویه به روش توزیع شده، الزامی است که هر مبدل از طریق سیستم ارتباطی به اطلاعات سایر واحدها دسترسی داشته باشد. سیستم ارتباطی بین واحدهای تولید پراکنده در ریزشبکه DC به دو روش اجرا می‌شود که در ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۲-۱ روش کنترل توزیع شده با برقراری ارتباط کامل^۱

در این روش برای اجرا کنترل‌کننده ثانویه به اطلاعات کل واحدهای DG نیاز است که این موضوع می‌تواند قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری ریزشبکه DC را کاهش دهد. در این حالت یک شبکه ارتباطی

^۱ Fully communicated control

اطلاعات موردنیاز اعم از ولتاژ، جریان و یا توان خروجی مبدل‌ها را جمع‌آوری می‌کند و با تمامی واحدهای تولید پراکنده در ریزشبکه DC به اشتراک می‌گذارد تا براساس این اطلاعات کنترل توزیع‌شده موردنظر اجرا شود و ولتاژ و جریان خروجی مبدل را تنظیم کند [۲].

۳-۲-۲ روش کنترل توزیع‌شده با برقراری ارتباط پراکنده^۱

تنظیم ولتاژ و جریان در واحدهای DG یک ریزشبکه DC به انتقال اطلاعات زیادی نیاز دارد. به منظور غلبه بر این مشکل از ارتباط پراکنده برای تنظیم متغیرها در روش کنترل توزیع‌شده استفاده می‌شود. در این روش هر مبدل نیاز دارد تا تنها با مبدل‌های همسایه خود ارتباط داشته باشد. این روش شبیه روش کنترل زنجیره‌ای-دایره‌ای در اینورترهای موازی در ریزشبکه AC است که برای عدم تطبیق جریان در اینورترها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین این روش ارتباطی با انتقال حجم اطلاعاتی کم بین واحدهای تولید پراکنده، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم را بهبود می‌دهد [۲۷-۳۲].

۳-۳ مرور مطالعات اخیر انجام شده در زمینه کنترل توزیع‌شده

در راستا کاهش انحراف ولتاژ خروجی و بهبود تقسیم بار بین واحدهای مختلف ریزشبکه DC، روش‌های کنترلی متفاوتی در سطح کنترل ثانویه به روش کنترل توزیع‌شده پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۷] به منظور بهبود عملکرد ریزشبکه DC، یک روش کنترل افقی بهبودیافته مبتنی بر سیستم ارتباطی با پهنای باند کم^۲ پیشنهاد شده است. در این روش از کنترل‌کننده‌های محلی و سیستم ارتباطی برای تبادل اطلاعات بین واحدهای مختلف ریزشبکه DC استفاده می‌شود. در این مرجع، در سطح اولیه از کنترل افقی و در سطح ثانویه از روش میانگین ولتاژ و جریان برای افزایش همزمان دقت در تقسیم جریان و بازیابی ولتاژ خروجی استفاده شده است. بنابراین از سیستم ارتباطی تنها برای انتقال اطلاعات ولتاژ و

¹ Sparse communicated control

² Low Bandwidth Communication

جریان استفاده می‌شود. در این مرجع تقسیم جریان در هنگام تغییرات بار به درستی انجام نخواهد شد چراکه افت ولتاژ خط ناشی از تغییرات بار در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این، در این مرجع به طراحی امپدانس مجازی واحدهای تولید پراکنده توجهی نشده است که این موضوع می‌تواند منجر به افزایش بیش از حد انحراف ولتاژ و در نهایت ناپایداری سیستم شود.

در مرجع [۳۳] از یک روش تقسیم ولتاژ میانگین در سطح ثانویه به عنوان کنترل توزیع‌شده برای جبران انحراف ولتاژ ناشی از کنترل اکتی استفاده شده است. روش کنترلی پیشنهادی از طریق سیستم ارتباطی، تنظیم ولتاژ خروجی واحدها را انجام داده و قابلیت اطمینان سیستم را در برابر خطا افزایش می‌دهد. در این مرجع نوسانات ولتاژ خط ناشی از انحراف بار در نظر گرفته نشده است، بنابراین تقسیم بار بین واحدهای مختلف ریزشبه DC به درستی انجام نخواهد شد.

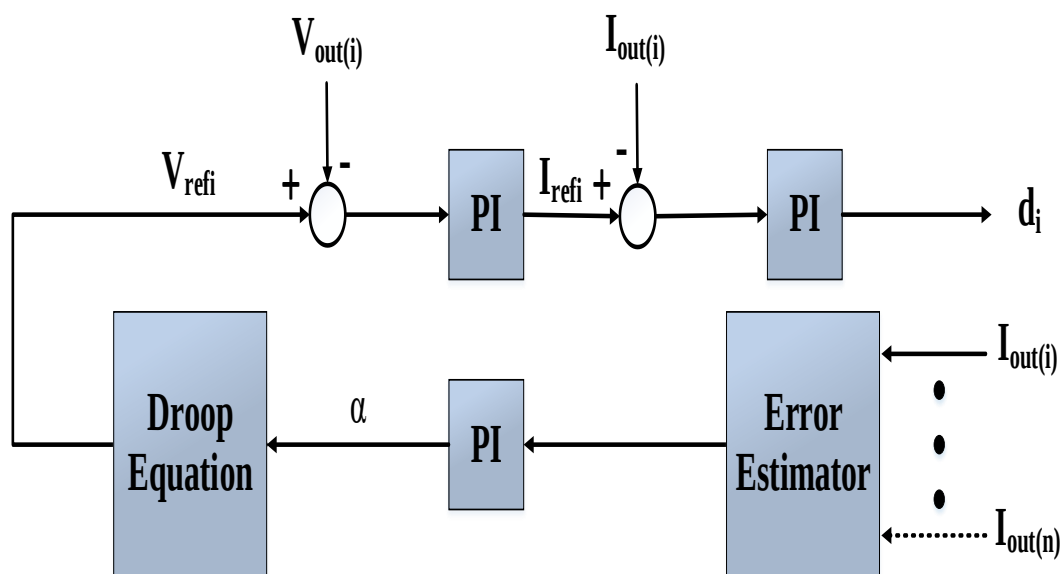
در مرجع [۳۴] یک کنترل‌کننده ثانویه توزیع‌شده مبتنی بر پروتکل اجماع^۱ ارائه شده است که هر مبدل تنها با تعدادی از مبدل‌های همسایه خود ارتباط دارد. در این روش از دو تنظیم‌کننده ولتاژ و جریان استفاده شده است، تنظیم‌کننده ولتاژ از یک الگوریتم جدید برای تخمین ولتاژ میانگین در ریزشبه DC استفاده می‌کند که مقدار ولتاژ نامی واحدها با استفاده از این مقدار تخمین زده شده محاسبه می‌شود. به‌طور همزمان، تنظیم‌کننده جریان، جریان پریونیت محلی را با جریان‌های پریونیت مبدل‌های همسایه مقایسه می‌کند و امپدانس مجازی را بر اساس این مقایسه تنظیم می‌کند. از آنجا که ولتاژ خروجی واحدهای DG برای دقت در تقسیم بار، به صورت خطی و با توجه به امپدانس خط تغییر می‌کنند، بنابراین ولتاژهای خروجی، به دلیل افت ولتاژ قابل توجه در خط از مقدار نامی منحرف خواهند شد.

در مرجع [۳۵] یک روش کنترل توزیع‌شده برای تضمین دقت تقسیم بار ارائه شده است. در روش پیشنهادی، نقطه کار هر واحد DG بر اساس توان لحظه‌ای واحد و میانگین توان واحدهای همسایه تعیین

² Consensus protocol

شده است. همچنین ولتاژ خروجی هر واحد DG نیز به وسیله کنترل کننده توان در مقدار نامی تنظیم می شود. در این مرجع از سیستم ارتباطی با پهنای باند کم برای انتقال اطلاعات مورد نیاز برای تعیین توان مبنا استفاده شده است. در این مرجع به دلیل اینکه افت ولتاژ خروجی واحدهای تولید پراکنده ناشی از مقاومت مجازی در نظر گرفته نشده است، ولتاژ باس DC به مقدار نامی بازایی نخواهد شد.

در مرجع [۳۶] یک روش کنترل توزیع شده جدید مبتنی بر ارتباط با پهنای باند کم پیشنهاد شده است. در حقیقت در این مرجع یک روش کنترل افتی با ضریب تطبیقی ارائه شده است که ضریب های افتی با توجه به جریان های خروجی واحدهای تولید پراکنده به صورت لحظه ای محاسبه می شوند. در این مقاله به ظرفیت های متفاوت واحدهای تولید پراکنده توجه شده است و تمام محاسبات و عملکرد کنترل کننده ها به صورت محلی انجام می شود و از سیستم ارتباطی تنها برای انتقال اطلاعات جریان استفاده می شود که این موضوع قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می دهد. با این حال در این مرجع، تنها به صحت در تقسیم بار پرداخته شده است و فقدان یک سازوکار مناسب برای تنظیم ولتاژ باس DC به مقدار نامی احساس می شود. در شکل (۵-۳) بلوک دیاگرام کنترلی روش پیشنهادی در مرجع [۳۶] نشان داده شده است.



شکل ۵-۳. بلوک دیاگرام روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در مرجع [۳۶]

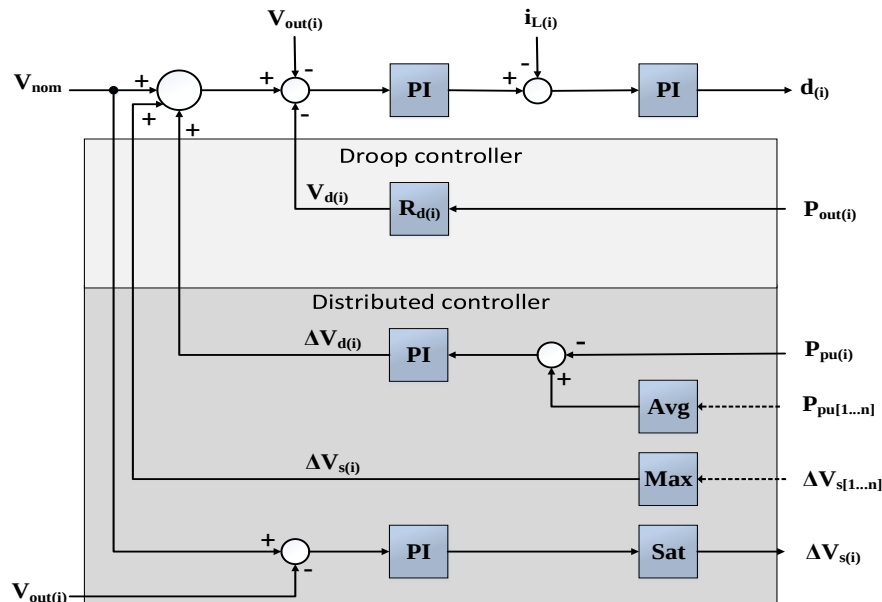
$$\alpha = G_{pi} \frac{I_{Ci} - i_i}{I_{ni}} \quad 0.01 \leq \alpha \leq 0.15 \quad (5-3)$$

$$I_{Ci} = \frac{i_{load} \times I_{ni}}{I_{ntotal}} \quad (6-3)$$

$$V_{refi} = V_{nom} - R_{di} \left(\frac{\exp(i_i)}{\exp(I_{ni})} \right)^\alpha i_i \quad (7-3)$$

در روابط فوق G_{pi} تابع انتقال کنترل کننده تناسبی-انتگرال گیر، I_{Ci} جریان خروجی صحیح، i_i جریان خروجی، I_{ni} جریان نامی، V_{refi} ولتاژ مرجع و R_{di} ضریب افتی واحد نام هستند. همچنین i_{load} جریان بار، I_{ntotal} مجموع جریان های خروجی نامی واحدها و V_{nom} ولتاژ نامی می باشند. α خروجی کنترل کننده تناسبی-انتگرال گیر می باشد.

در مرجع [۳۷] یک روش کنترل توزیع شده جدید برای دستیابی به تقسیم توان دقیق و بهبود بازیابی ولتاژ باس DC ارائه شده است.



شکل ۳-۶. بلوک دیاگرام روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در مرجع [۳۷]

در روش پیشنهادی از اطلاعات توان میانگین و ماکزیمم افت ولتاژ خروجی برای تنظیم ولتاژ مرجع هر واحد DG استفاده می شود. در روش کنترل توزیع شده پیشنهادی افت ولتاژ خط در نظر گرفته نشده

است، بنابراین نوسانات جریان بار منجر به انحراف ولتاژ در باس DC خواهد شد. بلوک دیاگرام کنترلی روش پیشنهادی در مرجع [۳۷] در شکل (۳-۶) قابل مشاهده است.

$$V_{d(i)} = R_{d(i)} \times P_{out(i)} \quad (۸-۳)$$

$$\Delta V_{d(i)} = (P_{di} + \frac{I_{di}}{S})(\overline{P_{pu}} - P_{pu_i}) \quad (۹-۳)$$

$$\Delta V_{s(i)} = (P_{si} + \frac{I_{si}}{S}) \times (V_{nom} - V_{out(i)}) \quad (۱۰-۳)$$

$$V_i^* = V_{nom} - V_{d(i)} + \Delta V_{d(i)} + \Delta V_{s(i)} \quad (۱۱-۳)$$

در روابط فوق $V_{d(i)}$ افت ولتاژ مجازی، $R_{d(i)}$ ضریب افتی، $P_{out(i)}$ توان خروجی، $V_{out(i)}$ ولتاژ خروجی و V_i^* ولتاژ مرجع واحد lam هستند. همچنین V_{nom} ولتاژ نامی و $\overline{P_{pu}}$ توان پریونیت میانگین می‌باشند.

برای اجرای روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در مرجع [۳۶] و [۳۷] نیاز به برقراری ارتباط کامل بین تمام واحدهای DG است که قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری ریزشبکه DC را کاهش می‌دهد. اما اخیراً یک روش کنترل توزیع‌شده مبتنی بر ارتباط پراکنده در مرجع [۳۸] پیشنهاد شده است که با اندازه‌گیری ولتاژ باس DC می‌تواند تقسیم بار صحیح و تنظیم ولتاژ باس DC را فراهم آورد. باوجود اینکه برای اجرای روش پیشنهادی در مرجع [۳۸] نیازی به ارتباط سرتاسری نیست، اما این روش با چالش تنظیم ضرایب متعدد روبه‌رو است، ضمن اینکه باید همواره از ولتاژ باس DC فیدبک گرفته شود.

در مرجع [۳۹] یک روش کنترل توزیع‌شده مبتنی بر ارتباط پراکنده پیشنهاد شده است که در آن فرض بر این است که مقادیر مقاومت‌های خط انتقال مشخص هستند. در این روش به جای استفاده از فیدبک ولتاژ باس DC برای محاسبه افت ولتاژ هر واحد تولید پراکنده (ناشی از کنترل افتی و افت ولتاژ خط انتقال)، از ضرب جریان خروجی در مجموع ضریب افتی و مقاومت خط انتقال استفاده شده است.

بنابراین روش پیشنهادی در این مرجع بسیار شبیه به مرجع [۳۸] است و با چالش تنظیم ضرایب متعدد روبه‌رو است. بعلاوه روش‌های پیشنهادی در هر دو مرجع [۳۸] و [۳۹] تنها با مقاومت‌های خط انتقال یکسان مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نمی‌تواند کارایی این روش‌ها را مورد تأیید قرار دهد.

۳-۴ جمع‌بندی:

در این فصل روش‌های پیشنهادی اخیر در زمینه کنترل توزیع‌شده در ریزشبکه DC مورد بررسی قرار گرفت که باتوجه به مطالب این فصل می‌توان گفت که اجرای روش کنترل توزیع‌شده به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود. در نوع اول از سیستم ارتباطی و اطلاعات جمع‌آوری شده از ریزشبکه DC در راستای تنظیم لحظه‌ای مشخصه افتی استفاده می‌شود. در نوع دوم، ولتاژ مرجع هر واحد DG با استفاده از اطلاعات در دسترس به صورت لحظه‌ای تغییر می‌کند درحالی که مشخصه افتی ثابت در نظر گرفته می‌شود. مراجع [۳۶] و [۳۷] به ترتیب از الگوریتم نوع اول و دوم استفاده کرده‌اند. این مراجع در فصل پنجم با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده و بیشتر مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در فصل بعد روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی برای دستیابی به تقسیم جریان صحیح و تنظیم ولتاژ بار دقیق ارائه و با مدل‌سازی و تحلیل پایداری سیگنال کوچک، به بررسی پایداری ریزشبکه DC تحت تغییرات پارامترهای مهمی همچون تاخیر در انتقال اطلاعات، بار اهمی و ضریب افتی پرداخته خواهد شد.

فصل ۴ : روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در زیر شبکه

DC

۴-۱ مقدمه

همان‌طور که گفته شد، از روش کنترل افتی در راستای تقسیم بار صحیح بین واحدهای DG استفاده می‌شود. این روش کنترلی کارایی خود را با وجود امپدانس‌های خط متفاوت از دست می‌دهد، ضمن اینکه روش کنترل افتی منجر به انحراف ولتاژ در خروجی مبدل می‌شود. بنابراین ضروری است از یک روش کنترل ثانویه در راستای بهبود عملکرد کنترلی ریزش‌بکه DC استفاده شود که در این فصل یک روش جدید در این زمینه معرفی خواهد شد.

۴-۲ روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی

هدف از اجرای سطح کنترل ثانویه بهبود عملکرد کنترلی ریزش‌بکه DC است. روش کنترلی مورد استفاده در این سطح کنترلی باید بتواند خطای تقسیم جریان را از بین ببرد و ولتاژ بار را در مقدار مطلوب تنظیم نماید که همان‌طور که گفته شد این موارد با استفاده از کنترل افتی امکان‌پذیر نیست. بنابراین روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در سطح ثانویه باید:

- خطای تقسیم بار بین واحدهای DG که ناشی از امپدانس‌های خط متفاوت است را رفع نماید.
- افت ولتاژ ایجاد شده ناشی از کنترل افتی را جبران نماید.
- افت ولتاژ ناشی از تلفات خط انتقال را جبران نماید.

بنابراین در عملکرد حالت دائم باید سه شرط زیر برقرار باشند:

$$1) R_{di} I_{outi} = R_{dj} I_{outj}$$

$$2) e = V_B - V_{ref} = 0$$

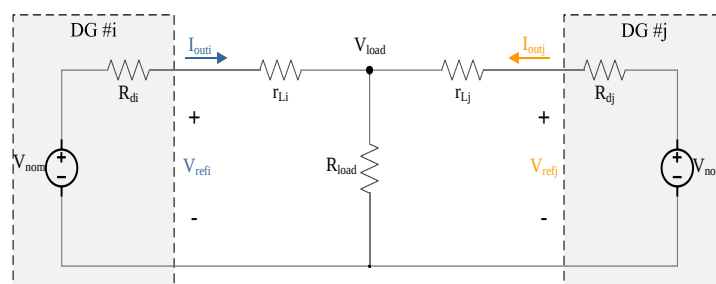
$$3) R_d \leq \frac{V_{nom} - V_{min}}{I_{ni}}$$

(۴-۱)

در شروط فوق I_{outj} , I_{outi} , R_{di} و R_{dj} به ترتیب جریان‌های خروجی و ضریب‌های اُفتی i و j نامین واحد DG، V_B ولتاژ باس DC، V_{ref} ولتاژ مرجع، V_{nom} و V_{min} به ترتیب ولتاژهای نامی و مینیمم باس DC و I_{ni} جریان نامی i نامین واحد DG می‌باشند.

در حقیقت شرط اول در (۴-۱) تضمین کننده برقراری تقسیم بار دقیق بین واحدهای DG براساس ظرفیت هر واحد و شرط دوم تضمین کننده جبران افت ولتاژ ناشی از اجرای کنترل اُفتی و تلفات خط انتقال در باس DC می‌باشد. شرط سوم تاثیری در حذف خطا در تقسیم بار بین واحدهای DG و یا بازیابی ولتاژ باس DC ندارد، برقراری این شرط از این جهت اهمیت دارد که با انتخاب ضریب اُفتی بزرگ ممکن است انحراف ولتاژ خروجی مبدل از مقدار مجاز فراتر رود و حاشیه پایداری ریزشبه DC تحت تاثیر قرار گیرد.

در این پایان‌نامه یک روش کنترل ثانویه (توزیع‌شده) پیشنهاد می‌شود که در آن به تمامی شروط فوق توجه شده است که می‌تواند منجر به تقسیم بار صحیح و تنظیم ولتاژ باس DC دقیق شود. در ریزشبه DC طراحی‌شده با روش کنترلی پیشنهادی، تمامی محاسبات و کنترل واحدها به صورت محلی انجام می‌شود و تنها از یک سیستم ارتباطی با پهنای باند کم برای انتقال اطلاعات استفاده شده است. در ادامه روش کنترلی پیشنهادی و محاسبات آن شرح داده خواهد شد، سپس مدل‌سازی سیگنال کوچک ریزشبه DC با بکارگیری روش کنترلی پیشنهادی انجام شده و تحلیل پایداری سیستم به دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.



شکل ۴-۱. مدل یک ریزشبه DC با دو واحد تولید پراکنده

برای بررسی ساده‌تر روش کنترلی پیشنهادی، مدل ریزشبه را به صورت شکل (۴-۱) در نظر می‌گیریم. در این شکل، R_{d1} و R_{d2} ضرایب افتی (مقاومت‌های مجازی)، r_{L1} و r_{L2} مقاومت‌های خط انتقال و R_{load} مقاومت بار می‌باشد.

در شکل (۴-۱)، ولتاژ دو سر بار برابر است با:

$$V_{load} = V_{dc} - R_{di}i_{outi} - r_{Li}i_{outi} \quad (۲-۴)$$

$$V_{load} = V_{dc} - R_{dj}I_{outj} - r_{Lj}I_{outj} \quad (۳-۴)$$

بنابراین نسبت تقسیم جریان بین دو واحد DG در یک ریزشبه DC برابر است با:

$$\frac{I_{outi}}{I_{outj}} = \frac{R_{dj} + r_{Lj}}{R_{di} + r_{Li}} \quad (۴-۴)$$

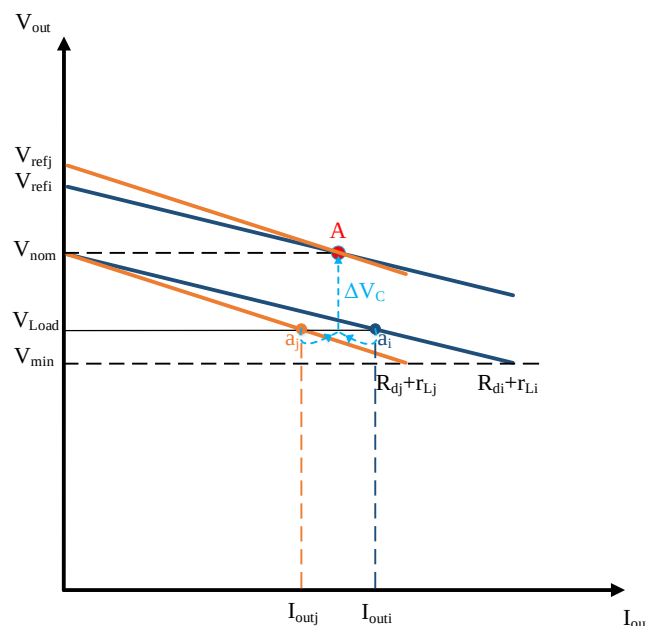
از شکل (۴-۱) و رابطه (۴-۴) می‌توان نتیجه گرفت که اگر امپدانس‌های خط متفاوت باشند، تقسیم توان بار متناسب نخواهد بود. با این حال اهداف دقت در تقسیم بار بین واحدهای DG و بازیابی ولتاژ باس DC می‌توانند از طریق تنها تنظیم ولتاژ V_{dc} حاصل شوند. شکل (۲-۴) مشخصه‌های کنترل افتی روش پیشنهادی را در قالب ولتاژ و جریان خروجی نشان می‌دهد. نقاط a_i و a_j به ترتیب نقاط کار واحدهای DG اول و دوم قبل از اجرای روش کنترل توزیع شده هستند. در این روش هدف تقسیم توان صحیح بین واحدهای DG و تنظیم ولتاژ دقیق باس DC تنها با اضافه کردن پارامتر ΔV_C به ولتاژ نامی حاصل خواهند شد. در حقیقت این پارامتر ولتاژ نامی هر واحد DG را تصحیح خواهد کرد که این کار منجر به حذف خطا در تقسیم بار و انحراف در ولتاژ باس DC خواهد شد. نقطه A ، نقطه کار جدید ریزشبه DC می‌باشد که در آن خطا در تقسیم بار و انحراف ولتاژ باس DC حذف شده‌اند.

دیگرام روش کنترلی پیشنهادی در شکل (۴-۳) نمایش داده شده است که شامل دو بخش کنترل اولیه (کنترل ولتاژ و جریان داخلی و کنترل افتی) و همچنین کنترل ثانویه (توزیع شده) می‌باشد. در بخش

کنترل توزیع شده، ΔV_C در راستای بهبود تقسیم بار بین واحدهای DG و همچنین بازیابی ولتاژ باس DC به ولتاژ نامی اضافه می‌شود. این پارامتر برابر است با:

$$\Delta V_{Ci} = \left[K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s} \right] \times \left[\sum (V_{d(adj)} - V_{di}) + (V_{nom} - V_i) + (r_{Li} \times I_i) \right] \quad (5-4)$$

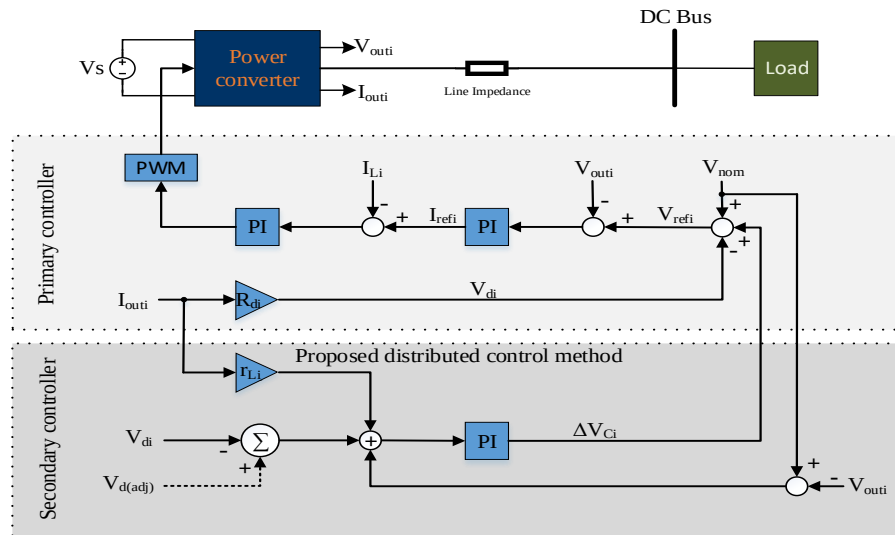
K_{ic} و K_{pc} ضریب‌های کنترل‌کننده PI مرتبط با کنترل توزیع‌شده پیشنهادی هستند. همان‌طور که در رابطه فوق مشاهده می‌شود خطای ورودی کنترل‌کننده PI قسمت کنترل توزیع‌شده از جمع سه جمله حاصل می‌شود. جمله اول دقت در تقسیم بار بین واحدهای DG را تضمین می‌کند، از این جمله در راستای برقراری شرط اول تعریف شده در (۴-۱) برای عملکرد کنترلی صحیح ریزش‌بکه DC استفاده شده است. جمله دوم جبران‌کننده افت ولتاژ خروجی ناشی از کنترل افتی و جمله سوم جبران‌کننده افت ولتاژ خط انتقال می‌باشد. از جملات دوم و سوم در راستای برقراری شرط دوم تعریف شده در (۴-۱) برای عملکرد کنترلی صحیح ریزش‌بکه DC استفاده شده است. در روش کنترلی پیشنهادی فرض شده است که امپدانس خط انتقال مشخص است [۳۹]. چنانچه امپدانس خط به صورت دقیق محاسبه نشده باشد، مقدار خطای اندازه‌گیری (ε) در حالت دائم قابل شناسایی و جبران است.



شکل ۴-۲. تغییرات مشخصه‌های افتی واحدهای DG در زمان اجرا روش کنترلی پیشنهادی

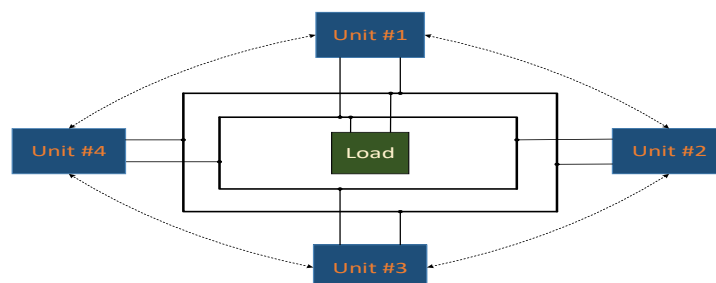
$$r_L^{real} = r_L^m \pm \varepsilon \quad (6-4)$$

در رابطه فوق r_L^{real} مقاومت خط انتقال حقیقی، r_L^m مقاومت خط انتقال اندازه‌گیری شده و ε خطای اندازه‌گیری می‌باشد.



شکل ۴-۳. بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی

تمامی مراجع [۳۳-۳۷] که در مورد آن‌ها بحث شد، برای اجرای روش کنترلی پیشنهادی خود نیاز به سیستم ارتباط سرتاسری^۱ دارند، این سیستم ارتباطی هزینه‌ها را افزایش می‌دهد و از قابلیت اطمینان کافی برخوردار نیست. روش کنترل ثانویه (توزیع شده) پیشنهادی در این پایان‌نامه نیاز به ارتباط سراسری ندارد، تنها کافی است هر واحد DG با واحدهای مجاور خود ارتباط داشته باشد. شکل (۴-۴) ریزشبکه DC طراحی شده و سیستم ارتباطی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴. سیستم ارتباطی بین واحدهای DG در ریزشبکه DC

^۱ All-to-all

همان‌طور که در فصل دو اشاره شد، در ریزشبه‌های DC کنترل اف‌تی، افت ولتاژ مجازی برای هر واحد DG را تعیین می‌کند. افت ولتاژ مجازی واحد DG نام در شکل (۳-۴) با ضرب جریان خروجی در ضریب اف‌تی R_{di} مشخص شده است. برای محاسبه ضریب اف‌تی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$R_{di} = \frac{V_{nom} - V_{min}}{I_{ni}} \quad (۷-۴)$$

افت ولتاژ مجازی نامین واحد DG از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{di} = R_{di} I_{outi} \quad (۸-۴)$$

در نهایت ولتاژ مرجع واحد DG نام در ریزشبه DC از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{refi} = V_{nom} + \Delta V_{Ci} - V_{di} \quad (۹-۴)$$

۳-۴ مدل‌سازی ریزشبه DC و تحلیل پایداری سیگنال کوچک

تمامی اجزاء ریزشبه DC تحت آزمایش شامل مبدل افزایشنده، کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان، کنترل اف‌تی و کنترل ثانویه توزیع‌شده در مدل‌سازی واحدهای DG مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین در این مدل‌سازی تمامی موارد همچون ضریب اف‌تی، امپدانس خط انتقال، تغییرات بار و همچنین تاخیر در انتقال اطلاعات در نظر گرفته شده‌اند.

چنانچه مبدل افزایشنده را به صورت مستقل مورد بررسی قرار دهیم، مشاهده می‌شود که تابع تبدیل آن یک صفر در سمت راست محور $j\omega$ دارد. این صفر ناپایدار در ذات مبدل افزایشنده وجود دارد و آن را به یک سیستم غیرمینیم فاز تبدیل می‌کند. به‌طور کل، توابع تبدیلی که همه صفرها و قطب‌های آن‌ها در سمت چپ محور $j\omega$ باشند، مینیم فاز^۱ هستند. همچنین به سیستم‌هایی که دارای توابع تبدیل مینیم فاز باشند، سیستم‌های مینیم فاز گویند. اگر تابع تبدیلی یک یا چند صفر در سمت راست محور $j\omega$

^۱ Minimum phase

داشته باشد، آن تابع تبدیل غیرمینیمم فاز^۱ است و سیستم‌هایی که توابع تبدیل غیرمینیمم فاز دارند را سیستم‌های غیرمینیمم فاز می‌نامند، سیستم‌های غیرمینیمم فاز با صفر ناپایدار را معکوس ناپایدار^۲ نیز می‌نامند [۴۱].

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های سیستم‌های غیرمینیمم فاز، کندتر بودن پاسخ آن‌ها نسبت به سیستم‌های مینیمم فاز متناظر است. پاسخ پله یک سیستم غیرمینیمم فاز، ابتدا در جهت خلاف مسیر موردنظر حرکت می‌کند و به همین دلیل اینگونه سیستم‌ها دارای عکس‌العمل اولیه‌ای مخالف با پاسخ مطلوب هستند. اما می‌توان با طراحی مناسب کنترل‌کننده و ضرایب آن، عملکرد اولیه سیستم غیرمینیمم فاز را تا حد زیادی بهبود بخشید [۴۰-۴۱].

در فصل دوم به‌طور کامل به معادلات مبدل بوست در حوزه زمان پرداخته شد. به هر حال برای بدست آوردن مدل مبدل افزایشنده، باید معادلات جریان سلف و ولتاژ خازن را در دو حالت زیر بدست آورد:

۱. کلید بسته و دیود باز

با توجه به شکل (۲-۳)، معادلات جریان سلف و ولتاژ خازن به صورت زیر می‌باشند:

$$I_L = \frac{V_{in}}{L_S} \quad (۴-۱۰)$$

$$V_C = -\frac{I_{out}}{C_S}$$

۲. کلید باز و دیود بسته

با توجه به شکل (۲-۴)، معادلات جریان سلف و ولتاژ خازن به صورت زیر می‌باشند:

$$I_L = \frac{V_{in} - V_{out}}{L_S} \quad (۴-۱۱)$$

$$V_C = \frac{I_L - I_{out}}{C_S}$$

^۱ Nonminimum phase

^۲ Inverse unstable

در این مرحله نیاز است مدل سوئیچی مبدل افزایشده محاسبه شود. در این راستا باید معادلات (۱۰-۴) در D و معادلات (۱۱-۴) در $(1-D)$ ضرب شوند. در نهایت از این محاسبات می‌توانیم معادلات مدل سوئیچی برای مبدل افزایشده را به صورت زیر بنویسیم:

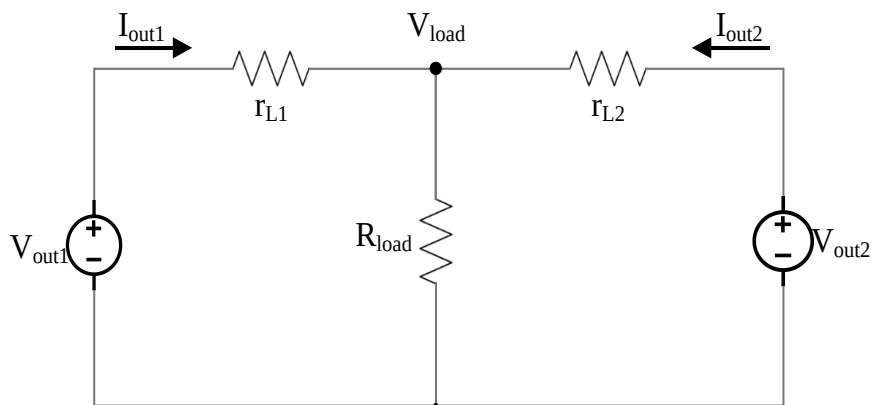
$$I_L = \frac{V_{in} - V_{out}(1 - D)}{Ls} \quad (12-4)$$

$$V_C = \frac{I_L(1 - D) - I_{out}}{Cs}$$

معادلات (۱۲-۴) در مدل‌سازی بلوکی مبدل افزایشده در شکل (۶-۴) مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل‌سازی شکل (۶-۴) از مدل تاخیر در ارسال و دریافت اطلاعات ارائه شده در مرجع [۲۷] استفاده شده است که می‌توان آن را در حوزه لاپلاس به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$G_d(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (13-4)$$

در رابطه فوق τ زمان تاخیر است.



شکل ۴-۵. مدل ولتاژ و جریان خروجی دو واحد تولید پراکنده در یک ریزشبه DC

یکی دیگر از مواردی که نیاز است به آن پرداخته شود، نحوه محاسبه جریان‌های خروجی با توجه به بار اهمی و امپدانس خط می‌باشد. در این راستا نیاز است از مدل ارائه شده در شکل (۵-۴) استفاده شود. در مدل موردنظر، ولتاژ خروجی واحد DG اول همان متغیر حالت x_2 و ولتاژ خروجی واحد DG دوم نیز

متغیر حالت x_8 می‌باشند. برای محاسبه جریان‌های خروجی باید از قانون KVL استفاده شود. برای ساده-سازی معادلات جریان خروجی واحدهای DG برحسب معادلات حالت، بار اهمی و امپدانس خط، روابط زیر را تعریف می‌کنیم:

$$m \triangleq r_{L2} + R_L$$

$$n \triangleq r_{L1} + R_L$$

$$p \triangleq r_{L1}R_L + r_{L2}R_L + r_{L1}r_{L2}$$

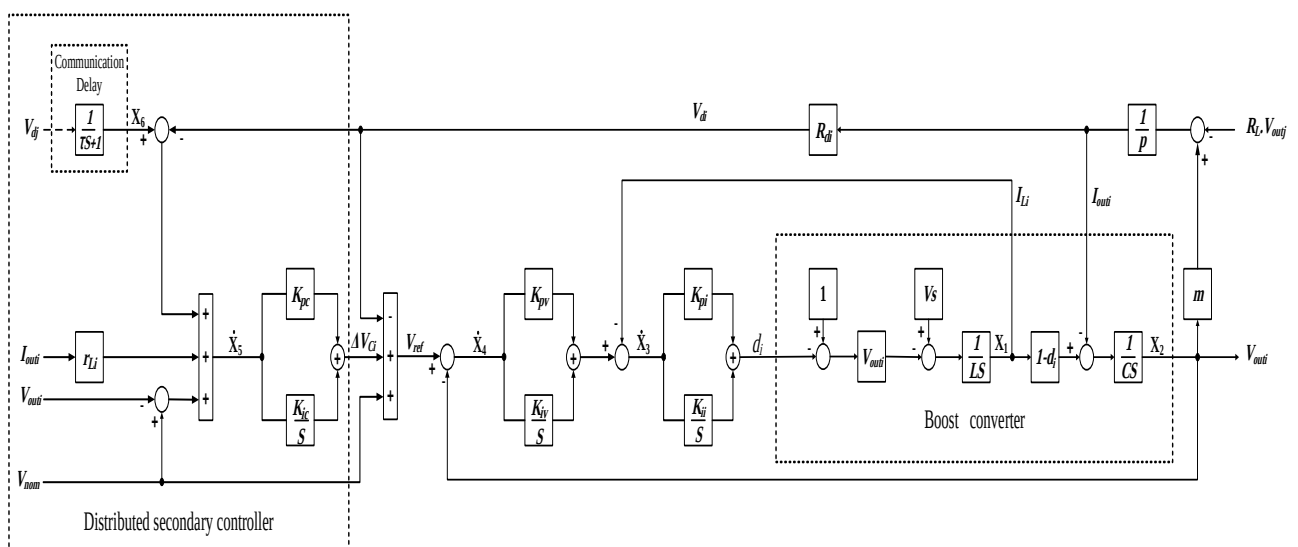
r_{L2} و r_{L1} مقاوت‌های خط انتقال و R_L مقاوت بار می‌باشد. با توجه به فرضیات فوق، جریان‌های

خروجی واحدهای DG به صورت زیر می‌باشند:

$$I_{out1} = \frac{mV_{out1} - R_L V_{out2}}{p} = \frac{mX_2 - R_L X_8}{p}$$

$$I_{out2} = \frac{nV_{out2} - R_L V_{out1}}{p} = \frac{nX_8 - R_L X_2}{p} \quad (4-14)$$

پس از ارائه مدل سوئیچی برای مبدل افزایشنده، بررسی مدل تاخیر در ارسال و دریافت اطلاعات، جریان‌های خروجی واحدهای DG و همچنین مدل‌سازی کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان، کنترل افقی و کنترل توزیع‌شده، که به آن‌ها اشاره شده بود، مدل کلی برای یک واحد DG که با واحدهای مجاور در ارتباط است، به صورت شکل (۴-۶) می‌باشد:



شکل ۴-۶. مدل کلی واحد DG نام از ریزشبه DC تحت آزمایش

جدول (۴-۱) متغیرهای حالت و توصیف آن‌ها را برای واحد DG اول از ریزشبكة DC ارائه می‌کند.

جدول ۴-۱. متغیرهای حالت برای واحد DG اول از ریزشبكة DC	
توصیف	متغیر حالت
جریان سلف	x_1
ولتاژ خازن خروجی	x_2
خروجی انتگرال گیر کنترل کننده جریان	x_3
خروجی انتگرال گیر کنترل کننده ولتاژ	x_4
خروجی انتگرال گیر کنترل توزیع شده	x_5
افت ولتاژ مجازی واحد مجاور با تاخیر در انتقال اطلاعات	x_6

مطابق با جدول (۴-۱)، می‌توان متغیرهای حالت واحد DG مجاور را به صورت مشابه $[x_7 \dots x_{12}]$ تعریف کرد. با توجه به شکل (۴-۶)، معادلات فضای حالت برای ریزشبكة DC با دو واحد DG به صورت روابط (۴-۱۵) تا (۴-۲۶) می‌باشند. در این روابط V_s ولتاژ ورودی (منبع) و همچنین K_{ii} و K_{pi} ، K_{iv} ، K_{pv} ضرایب کنترل کننده‌های ولتاژ و جریان هستند. مابقی پارامترها در صفحات قبل تعریف شده‌اند.

$$\dot{x}_1 = \frac{V_s}{L_1} - \frac{K_{pi1}}{L_1} x_1 x_2 + \left(\frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1} r_{L1} m}{pL_1} - \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1} R_{d1} m}{pL_1} - \frac{K_{pi1} K_{pv1} R_{d1} m}{pL_1} - \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1}}{L_1} - \frac{K_{pi1} K_{pv1}}{L_1} \right) x_2^2 - \frac{1}{L_1} x_2 + \frac{I_{i1}}{L_1} x_2 x_3 + \frac{K_{pi1} K_{iv1}}{L_1} x_2 x_4 + \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{ic1}}{L_1} x_2 x_5 + \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1}}{L_1} x_2 x_6 + \left(\frac{K_{pi1} K_{pv1} R_{d1} R_L}{pL_1} + \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1} R_{d1} R_L}{pL_1} - \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1} r_{L1} R_L}{pL_1} \right) x_2 x_8 + \left(\frac{K_{pi1} K_{pv1}}{L_1} + \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1}}{L_1} \right) V_{nom} x_2 \quad (۴-۱۵)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_1} x_1 + \frac{K_{pi1}}{C_1} x_1^2 - \frac{m}{pC_1} x_2 + \left(\frac{K_{pi1} K_{pv1}}{C_1} + \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1}}{C_1} + \frac{K_{pi1} K_{pv1} R_{d1} m}{pC_1} + \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1} R_{d1} m}{pC_1} - \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1} r_{L1} m}{pC_1} \right) x_1 x_2 - \frac{K_{ii1}}{C_1} x_1 x_3 - \frac{K_{pi1} K_{iv1}}{C_1} x_1 x_4 - \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{ic1}}{C_1} x_1 x_5 - \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1}}{C_1} x_1 x_6 + \left(\frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1} r_{L1} R_L}{pC_1} - \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1} R_{d1} R_L}{pC_1} - \frac{K_{pi1} K_{pv1} R_{d1} R_L}{pC_1} \right) x_1 x_8 + \frac{R_L}{pC_1} x_8 - \left(\frac{K_{pi1} K_{pv1}}{C_1} + \frac{K_{pi1} K_{pv1} K_{pc1}}{C_1} \right) V_{nom} x_1 \quad (۴-۱۶)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 = & -x_1 + \left(\frac{K_{pv1}K_{pc1}r_{L1}m}{p} - \frac{K_{pv1}K_{pc1}R_{d1}m}{p} - \frac{K_{pv1}R_{d1}m}{p} - K_{pv1}K_{pc1} - K_{pv1} \right) x_2 + \\ & K_{iv1}x_4 + K_{pv1}K_{ic1}x_5 + K_{pv1}K_{pc1}x_6 + \left(\frac{K_{pv1}R_{d1}R_L}{p} + \frac{K_{pv1}K_{pc1}R_{d1}R_L}{p} - \frac{K_{pv1}K_{pc1}r_{L1}R_L}{p} \right) x_8 + \\ & (K_{pv1} + K_{pv1}K_{pc1})V_{nom}\end{aligned}\quad (17-4)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_4 = & \left(\frac{K_{pc1}r_{L1}m}{p} - \frac{K_{pc1}R_{d1}m}{p} - \frac{R_{d1}m}{p} - K_{pc1} - 1 \right) x_2 + K_{ic1}x_5 + K_{pc1}x_6 + \left(\frac{R_{d1}R_L}{p} + \right. \\ & \left. \frac{K_{pc1}R_{d1}R_L}{p} - \frac{K_{pc1}r_{L1}R_L}{p} \right) x_8 + (1 + K_{pc1})V_{nom}\end{aligned}\quad (18-4)$$

$$\dot{x}_5 = \left(\frac{r_{L1}m}{p} - \frac{R_{d1}m}{p} - 1 \right) x_2 + x_6 + \left(\frac{R_{d1}R_L}{p} - \frac{r_{L1}R_L}{p} \right) x_8 + V_{nom}\quad (19-4)$$

$$\dot{x}_6 = \left(-\frac{R_{d2}R_L}{p\tau} \right) x_2 - \left(\frac{1}{\tau} \right) x_6 + \left(\frac{R_{d2}n}{p\tau} \right) x_8\quad (20-4)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_7 = & \frac{V_s}{L_2} - \frac{K_{pi2}}{L_2} x_7 x_8 + \left(\frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}r_{L2}n}{pL_2} - \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}R_{d2}n}{pL_2} - \frac{K_{pi2}K_{pv2}R_{d2}n}{pL_2} - \right. \\ & \left. \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}}{L_2} - \frac{K_{pi2}K_{pv2}}{L_2} \right) x_8^2 - \frac{1}{L_2} x_8 + \frac{I_{i2}}{L_2} x_8 x_9 + \frac{K_{pi2}K_{iv2}}{L_2} x_8 x_{10} + \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{ic2}}{L_2} x_8 x_{11} + \\ & \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}}{L_2} x_8 x_{12} + \left(\frac{K_{pi2}K_{pv2}R_{d2}R_L}{pL_2} + \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}R_{d2}R_L}{pL_2} - \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}r_{L2}R_L}{pL_2} \right) x_8 x_2 + \\ & \left(\frac{K_{pi2}K_{pv2}}{L_2} + \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}}{L_2} \right) V_{nom} x_8\end{aligned}\quad (21-4)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_8 = & \frac{1}{C_2} x_7 + \frac{K_{pi2}}{C_2} x_7^2 - \frac{n}{r_3 C_2} x_8 + \left(\frac{K_{pi2}K_{pv2}}{C_2} + \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}}{C_2} + \frac{K_{pi2}K_{pv2}R_{d2}n}{r_3 C_2} + \right. \\ & \left. \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}R_{d2}n}{pC_2} - \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}r_{L2}n}{pC_2} \right) x_7 x_8 - \frac{K_{i2}}{C_2} x_7 x_9 - \frac{K_{pi2}K_{iv2}}{C_2} x_7 x_{10} - \\ & \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{ic2}}{C_2} x_7 x_{11} - \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}}{C_2} x_7 x_{12} + \left(\frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}r_{L2}R_L}{pC_2} - \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}R_{d2}R_L}{pC_2} - \right. \\ & \left. \frac{K_{pi2}K_{pv2}R_{d2}R_L}{pC_2} \right) x_7 x_2 + \frac{R_L}{pC_2} x_2 - \left(\frac{K_{pi2}K_{pv2}}{C_2} + \frac{K_{pi2}K_{pv2}K_{pc2}}{C_2} \right) V_{nom} x_7\end{aligned}\quad (22-4)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_9 = & -x_2 + \left(\frac{K_{pv2}K_{pc2}r_{L2}n}{p} - \frac{K_{pv2}K_{pc2}R_{d2}n}{p} - \frac{K_{pv2}R_{d2}n}{p} - K_{pv2}K_{pc2} - K_{pv2} \right) x_8 + K_{iv2}x_{10} + \\ & K_{pv2}K_{ic2}x_{11} + K_{pv2}K_{pc2}x_{12} + \left(\frac{K_{pv2}R_{d2}R_L}{p} + \frac{K_{pv2}K_{pc2}R_{d2}R_L}{p} - \frac{K_{pv2}K_{pc2}r_{L2}R_L}{p} \right) x_2 + \\ & (K_{pv2} + K_{pv1}K_{pc2})V_{nom}\end{aligned}\quad (23-4)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{10} = & \left(\frac{K_{pc2}r_{L2}n}{p} - \frac{K_{pc2}R_{d2}n}{p} - \frac{R_{d2}n}{p} - K_{pc2} - 1 \right) x_8 + K_{ic2}x_{11} + K_{pc2}x_{12} + \left(\frac{R_{d2}R_L}{p} + \right. \\ & \left. \frac{K_{pc2}R_{d2}R_L}{p} - \frac{K_{pc2}r_{L2}R_L}{p} \right) x_2 + (1 + K_{pc2})V_{nom}\end{aligned}\quad (24-4)$$

$$\dot{x}_{11} = \left(\frac{R_{d2}R_L}{p} - \frac{r_{L2}R_L}{p} \right) x_2 + \left(\frac{r_{L2}n}{p} - \frac{R_{d2}n}{p} - 1 \right) x_8 + x_{12} + V_{nom}\quad (25-4)$$

$$\dot{x}_{12} = \left(\frac{R_{d1}m}{p\tau} \right) x_2 - \left(\frac{R_{d1}R_L}{p\tau} \right) x_8 - \left(\frac{1}{\tau} \right) x_{12}\quad (26-4)$$

معادلات فوق غیرخطی هستند و این به دلیل ضرب متغیرهای حالت در یکدیگر می‌باشد. بنابراین معادلات فوق باید خطی‌سازی شوند. در این راستا ابتدا باید تمامی مشتق متغیرهای حالت برابر صفر قرار گیرند تا نقاط تعادل سیستم محاسبه شوند، این نقاط با زیرنویس e مشخص شده‌اند. سیستم خطی شده حول این نقاط تعادل را می‌توان به صورت زیر نوشت که همان مدل سیگنال کوچک است و $\sim$ نشان‌دهنده تغییرات کوچک حول نقطه کار می‌باشد [۴۰]:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}} &= A\tilde{x} + B\tilde{u} \\ \tilde{y} &= C\tilde{x} + D\tilde{u}\end{aligned}\quad (۲۷-۴)$$

که در معادلات فوق A ماتریس حالت، B ماتریس ورودی، C ماتریس خروجی و D ماتریس انتقال سیستم هستند.

$$\begin{aligned}A &= \left(\frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right)_{x_e, u_e} \\ B &= \left(\frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right)_{x_e, u_e} \\ C &= \left(\frac{\partial h(x, u)}{\partial x} \right)_{x_e, u_e} \\ D &= \left(\frac{\partial h(x, u)}{\partial u} \right)_{x_e, u_e}\end{aligned}\quad (۲۸-۴)$$

فرم سیستم غیرخطی پیوسته به صورت زیر می‌باشد که از آن در معادلات فوق استفاده شده است:

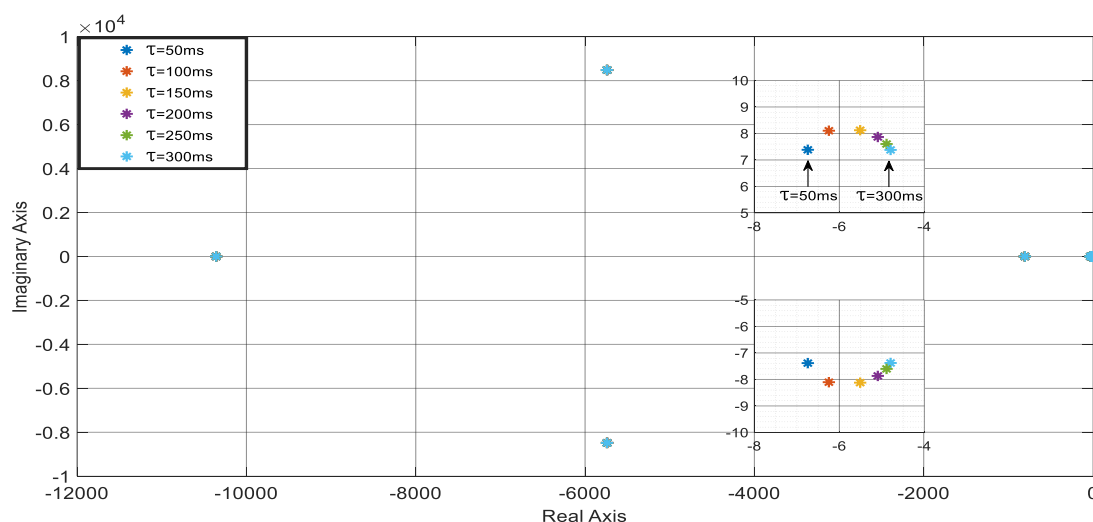
$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}x &= f(x(t), u(t)) \\ y &= h(x(t), u(t))\end{aligned}\quad (۲۹-۴)$$

در حقیقت نتایج بدست آمده حاصل از معادلات (۲۷-۴) و (۲۸-۴)، مدل سیگنال کوچک سیستم موردنظر می‌باشند که بر خلاف مدل سیگنال بزرگ که در کل محدوده تعریف معتبر بود، تنها برای تغییرات اندک حول نقطه کار موردنظر معتبر هستند. محاسبه نقاط تعادل و مدل سیگنال کوچک سیستم تحت آزمایش بسیار پیچیده و به صورت دستی غیرقابل حل هستند. این محاسبات و تحلیل

پایداری سیگنال کوچک برای ریزشبه DC در نرم‌افزار MATLAB/M-File انجام و نتایج در ادامه ارائه خواهند شد.

۴-۴ تاثیر پارامترهای مختلف سیستم بر پایداری سیگنال کوچک ریزشبه DC

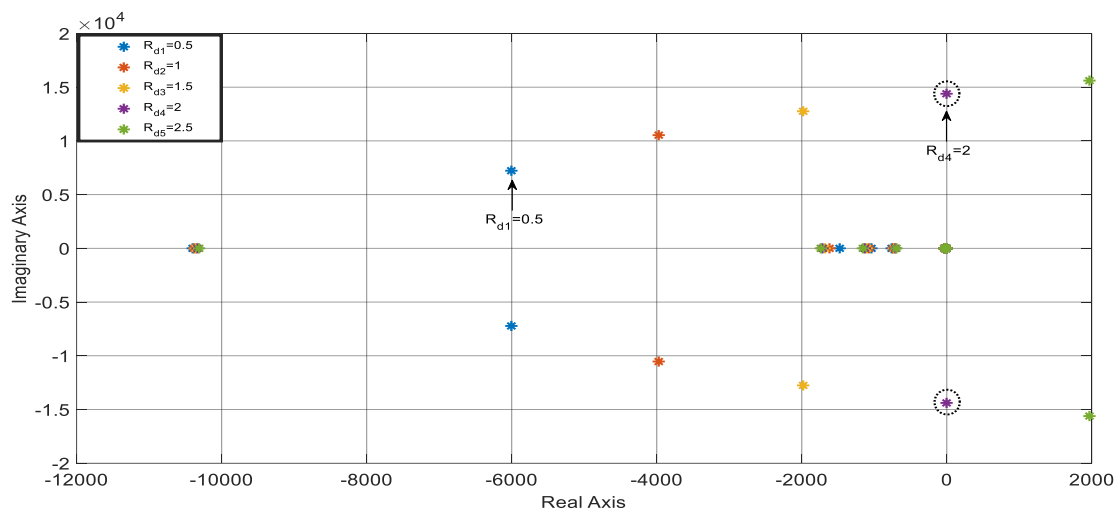
پس از بدست آوردن معادلات مدل سیگنال کوچک برای ریزشبه DC تحت آزمایش، نیاز است پاسخ سیستم مورد نظر به تغییرات پارامترها و در نتیجه پایداری سیگنال کوچک مورد بررسی قرار گیرد. یکی از مهمترین پارامترهایی که در روش کنترل توزیع‌شده تغییرات آن بر پایداری سیگنال کوچک سیستم تاثیر می‌گذارد، تاخیر در ارسال و دریافت اطلاعات است. شکل (۷-۴) مکان هندسی مقادیر ویژه ریزشبه DC به ازاء سیستم با تاخیر ۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۴. تغییرات مقادیر ویژه سیستم به ازاء تغییرات تاخیر در انتقال اطلاعات (τ)

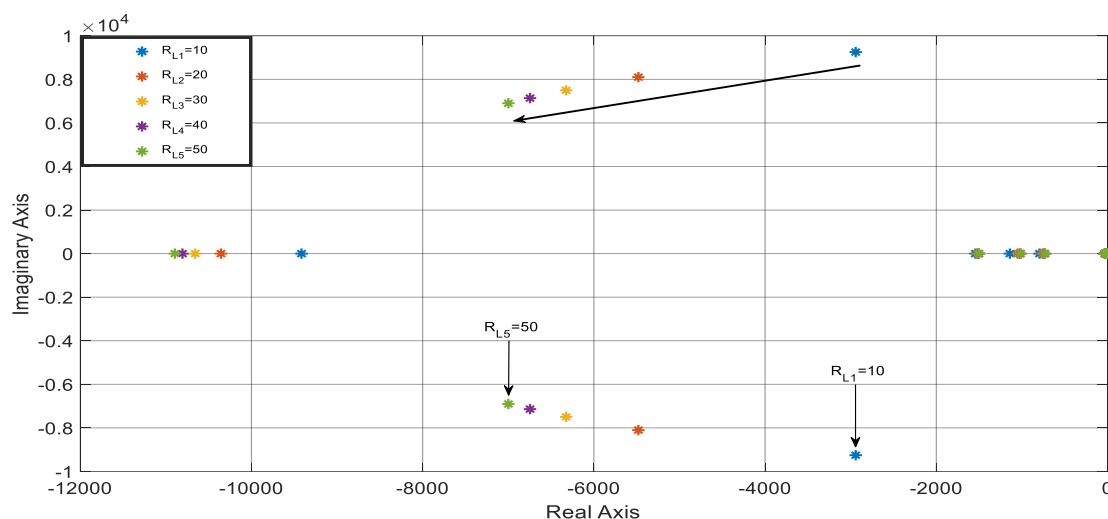
همان‌طور که در شکل (۷-۴) مشاهده می‌شود، با افزایش تاخیر، مقادیر ویژه حساس به تاخیر به سمت راست صفحه حرکت می‌کنند اما این تغییر محل مقادیر ویژه در صفحه بسیار جزئی بوده و سیستم می‌تواند تحت تاخیر در انتقال اطلاعات پایداری خود را حفظ می‌کند.

یکی دیگر از پارامترهای مهمی که باید پایداری سیستم تحت تغییرات آن مورد بررسی قرار گیرد، ضریب افتی است. شکل (۸-۴) مکان هندسی مقادیر ویژه ریزشکه DC تحت آزمایش را به ازاء تغییرات R_d از ۰/۵ تا ۲/۵ را نشان می‌دهد. در این آزمایش ضریب افتی هر دو واحد DG برابر در نظر گرفته شده است تا بتوانیم تاثیر این پارامتر را بر پایداری سیستم بررسی کنیم. همان‌طور که در شکل (۸-۴) مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار ضریب افتی، مقادیر ویژه سیستم به سمت راست حرکت می‌کنند و سیستم موردنظر به ازاء ضریب افتی‌های بیشتر از مقدار ۲ ناپایدار خواهد شد. بنابراین می‌توان گفت افزایش مقدار ضریب افتی منجر به کاهش حاشیه پایداری سیستم خواهد شد.



شکل ۸-۴. تغییرات مقادیر ویژه سیستم به ازاء تغییرات ضریب افتی (R_d)

آخرین پارامتری که باید پایداری سیگنال کوچک سیستم تحت تغییرات آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد، بار اهمی می‌باشد. شکل (۹-۴) مکان هندسی مقادیر ویژه ریزشکه DC را به ازاء تغییرات R_L از ۱۰ تا ۵۰ اهم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۹-۴) مشاهده می‌شود، سیستم می‌تواند پایداری خود را به ازاء تغییرات بار اهمی در یک محدوده قابل قبول حفظ کند اما باید در نظر داشت که با کاهش مقدار مقاومت (بزرگ شدن بار) و افزایش جریان خروجی، مقادیر ویژه سیستم به سمت راست صفحه حرکت می‌کنند (حاشیه پایداری کاهش می‌یابد).



شکل ۴-۹. تغییرات مقادیر ویژه سیستم به ازاء تغییرات بار اهمی (R_L)

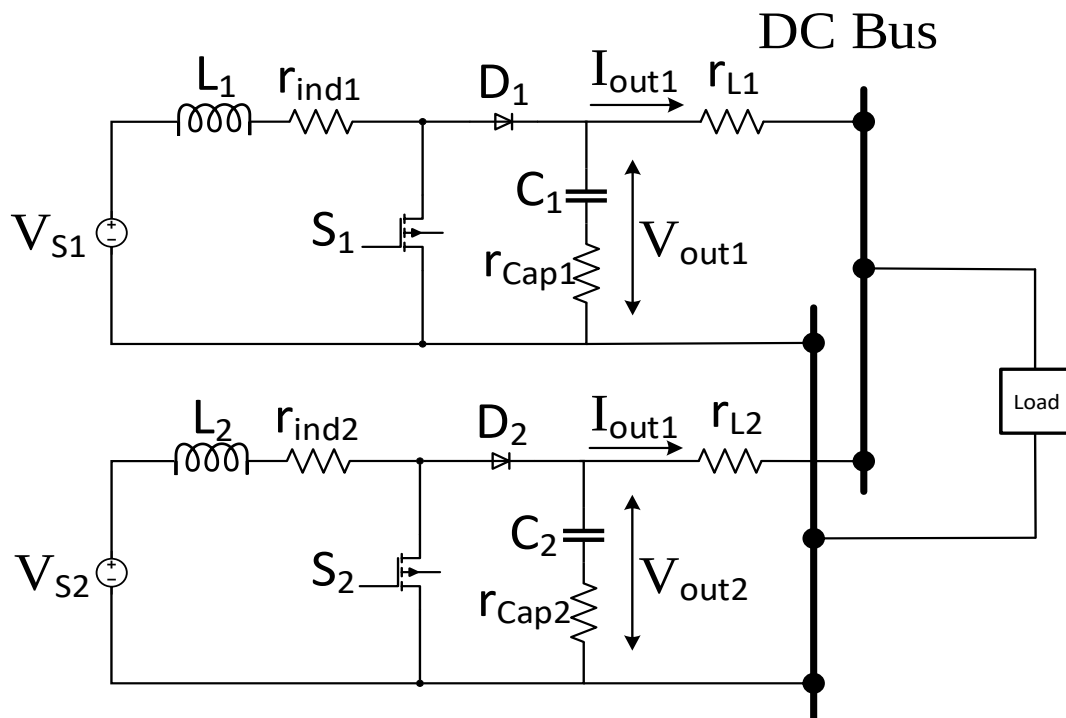
۴-۵ جمع بندی:

در این فصل روش کنترل توزیع شده پیشنهادی ارائه شد و پایداری ریزشکه DC شامل مبدل افزایشده، کنترل کننده های داخلی ولتاژ و جریان، کنترل افتی و کنترل توزیع شده پیشنهادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی پایداری سیگنال کوچک ریزشکه DC تحت آزمایش نشان دهنده پایداری سیستم تحت تغییرات پارامترهایی همچون تاخیر در انتقال اطلاعات، ضریب افتی و بار اهمی می باشد. در فصل بعد کارایی روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در ریزشکه DC تحت آزمایش با استفاده از نرم افزار MATLAB/Simulink مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس برای تأیید نتایج حاصل از شبیه سازی، روش پیشنهادی در محیط آزمایشگاه به صورت عملی در یک ریزشکه DC بکار گرفته خواهد شد.

فصل ۵ : نتایج شبیه سازی و کار عملی در محیط آزمایشگاه

۵-۱ مقدمه

در فصل چهارم یک روش کنترل توزیع شده جدید در راستای تقسیم بار صحیح بین واحدهای تولید پراکنده و تنظیم ولتاژ بار دقیق در یک ریزشبكة DC ارائه شد. در این فصل به منظور تجزیه و تحلیل عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی تحت شرایط مختلف و تأیید کارایی آن، یک ریزشبكة DC شامل دو واحد DG که با دو مبدل افزایشنده به بار متصل می شوند، طراحی می شود. این ریزشبكة DC در محیط MATLAB/Simulink شبیه سازی خواهد شد و تحت آزمایش های مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به منظور تجزیه و تحلیل دقیق تر، یک ریزشبكة DC با چهار واحد DG نیز طراحی شده و با آزمایش های متفاوت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای تأیید رفتار سیستم موردنظر در محیط شبیه سازی، یک ریزشبكة DC شامل دو واحد DG در محیط آزمایشگاه نیز تحت شرایط یکسان با شبیه سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. در شکل زیر r_{ind} مقاومت داخلی سلف و r_{cap} مقاومت داخلی خازن می باشد.



شکل ۵-۱. ریزشبكة DC شامل دو واحد DG موازی

۵-۲ معرفی ریزشبكة DC تحت آزمایش

شکل (۵-۱) یک ریزشبكة DC را نشان می‌دهد که در آن دو مبدل افزایشنده به صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته و بار را تغذیه می‌کنند. مقادیر پارامترهای موردنیاز این سیستم در جداول (۵-۱) و (۵-۲) ارائه شده است. پارامترهای موردنیاز برای مبدل افزایشنده با توجه به روابط فصل دوم محاسبه شده‌اند.

۵-۳ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش روش کنترل افی و معایب آن و همچنین اثر روش کنترل توزیع شده پیشنهادی بر بهبود عملکرد این سیستم کنترلی در یک ریزشبكة DC بررسی می‌شود. در این راستا یک ریزشبكة DC شامل دو واحد DG طراحی شده است که واحدهای تولید پراکنده در آن به صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته‌اند و از طریق دو مبدل افزایشنده بار موردنظر را تغذیه می‌کنند. ریزشبكة DC موردنظر تحت آزمایش‌های مختلف، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink در ادامه ارائه می‌گردد.

جدول ۵-۱. پارامترهای ریزشبكة DC

مقدار	واحد	نماد	پارامتر
۱۲	V	V_{in}	ولتاژ ورودی
۲۴	V	V_{nom}	ولتاژ نامی
۲۱	V	V_{min}	حداقل ولتاژ
۰/۵	mH	L	سلف
۲۲۰۰	μF	C	خازن
۰/۵	Ω	r_{ind}	مقاومت سلف
۰/۱۵	Ω	r_{cap}	مقاومت خازن
۱۰	KHz	F_s	فرکانس کلیدزنی

جدول ۵-۲. پارامترهای واحدهای DG برای ریزشبکه DC دو واحدی

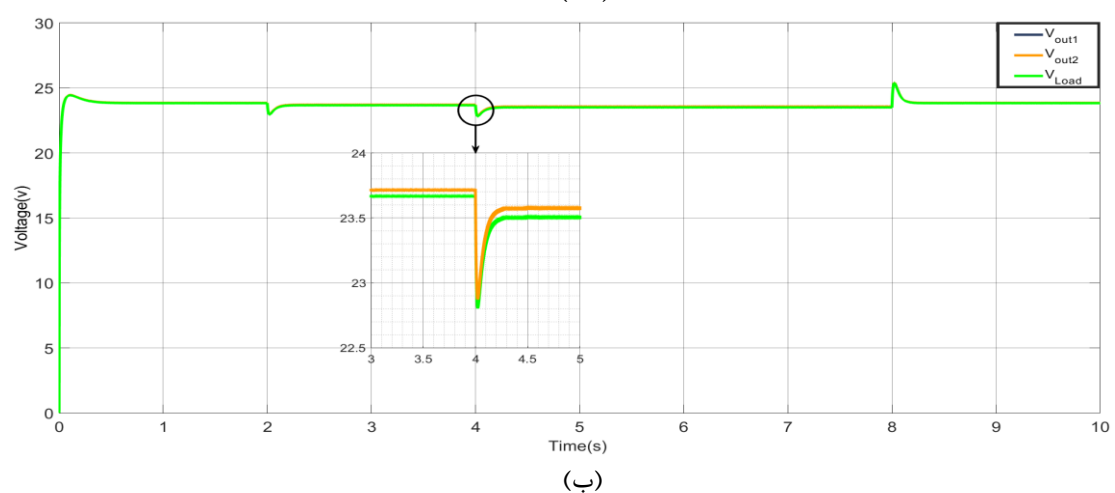
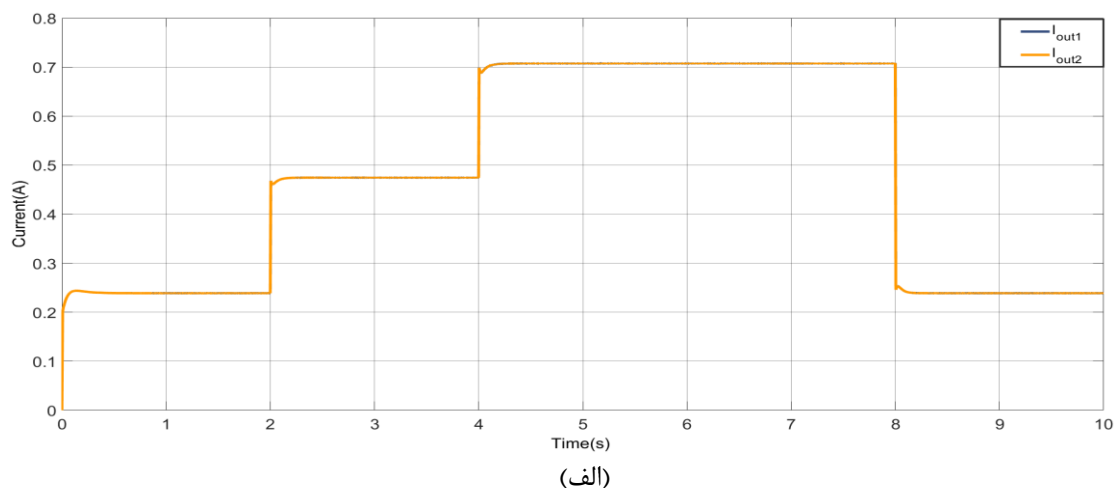
	DG #1	DG #2
جریان نامی (A)	۵	۵
مقاومت خط انتقال (Ω)	۰/۱	۰/۲
ضریب کنترل کننده تناسبی ولتاژ (K_{pv})	۰/۷۵	۰/۷۵
ضریب کنترل کننده انتگرالی ولتاژ (K_{iv})	۲۵	۲۵
ضریب کنترل کننده تناسبی جریان (K_{pi})	۰/۵	۰/۵
ضریب کنترل کننده انتگرالی جریان (K_{ii})	۱۵	۱۵

۵-۳-۱ بررسی عملکرد روش کنترل افی در ریزشبکه DC

همان‌طور که گفته شد، از روش کنترل افی به صورت متداول در راستای تقسیم بار صحیح بین واحدهای DG در ریزشبکه DC استفاده می‌شود. این روش تا زمانی کارایی دارد که از مقاومت خط صرف‌نظر شود و یا اینکه امپدانس‌های خط دقیقاً برابر در نظر گرفته شوند، در غیر این‌صورت این روش کارایی لازم را نخواهد داشت، ضمن اینکه این روش خود منجر به انحراف ولتاژ باس DC خواهد شد. در این بخش کارایی و دقت روش کنترل افی مورد بررسی قرار خواهد گرفت، سپس به تحلیل این آزمایش‌ها و لزوم استفاده از کنترل ثانویه پرداخته خواهد شد.

آزمایش اول: بررسی عملکرد روش کنترل افی با امپدانس‌های خط یکسان

در این آزمایش، دو واحد DG با مشخصات ارائه‌شده در جدول (۵-۱) و (۵-۲) به صورت موازی قرار گرفته‌اند. مقدار ضریب‌های افی برای هر دو واحد، با توجه به رابطه‌ی ارائه شده در فصل قبل، برابر با ۰/۶ قرار داده شده‌اند. امپدانس‌های خط یکسان و برابر ۰/۱ می‌باشند. زمان انجام آزمایش ۱۰ ثانیه می‌باشد که تغییرات بار در طول زمان آزمایش در جدول (۵-۳) ارائه شده است. نتایج این شبیه‌سازی در ادامه مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت.



شکل ۵-۲. نتایج آزمایش اول برای بار اهمی و امپدانس‌های خط برابر با کنترل اف‌تی. الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

همان‌طور که بیان شد، روش کنترل اف‌تی که در راستای تقسیم بار صحیح بین واحدهای DG یک ریزشکه DC مورد استفاده قرار می‌گیرد، تا زمانی کارایی دارد که از امپدانس خط صرف‌نظر شود و یا اینکه امپدانس‌های خط دقیقاً برابر در نظر گرفته شوند. همان‌طور که در شکل (۵-۲-الف) مشاهده می‌شود، با امپدانس‌های خط برابر، تقسیم بار بین واحدهای DG دقیقاً متناسب با ضریب اف‌تی می‌باشد، اما یکسان بودن امپدانس‌های خط تنها در محیط شبیه‌سازی امکان‌پذیر است و این فرض در محیط آزمایشگاه و پیاده‌سازی ریزشکه DC غیرقابل قبول است. از طرفی، با وجود اینکه تقسیم بار بین واحدهای DG به‌طور صحیح انجام شده است، ولتاژ خروجی مبدل‌های افزاینده مورد استفاده کمتر از مقدار نامی می‌باشد و این مقدار در خط انتقال مجدداً کاهش خواهد یافت. در حالت بارگذاری سنگین

آزمایش اول حدود دو درصد انحراف ولتاژ بار مشاهده می‌شود. این ناکارآمدی کنترل اف‌تی و عدم تنظیم ولتاژ خروجی مبدل‌های افزایشنده در شکل (۵-۲-ب) قابل مشاهده است.

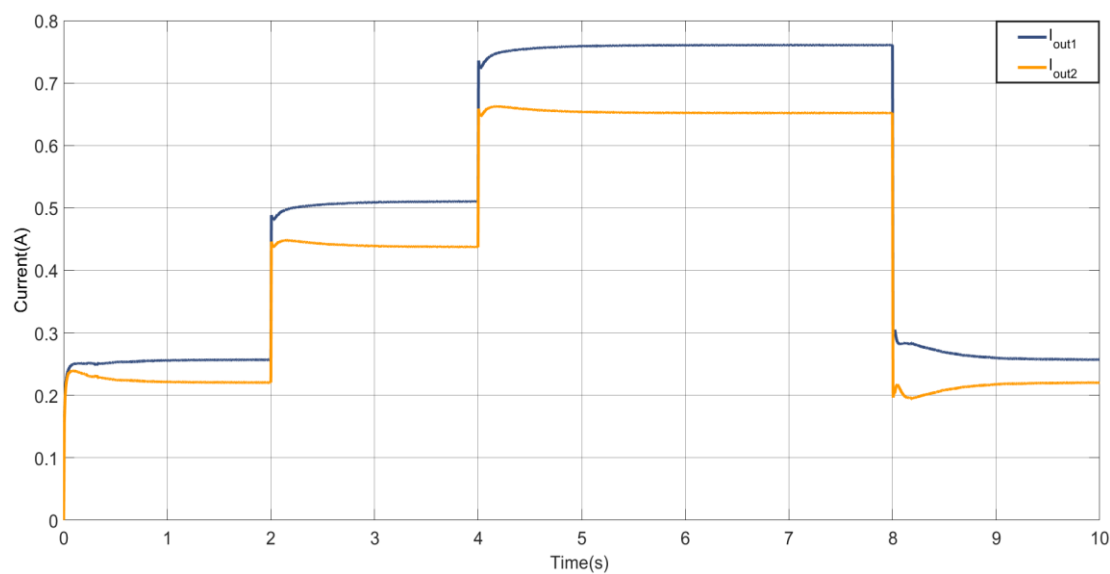
جدول ۵-۳. تغییرات بار اهمی و توان ثابت در طول آزمایش

زمان (s)	۰ تا ۲	۲ تا ۴	۴ تا ۸	۸ تا ۱۰
مقاومت بار (Ω)	۵۰	۲۵	۱۶/۶۷	۵۰
بار توان ثابت (w)	۱۲	۲۴	۳۶	۲۴

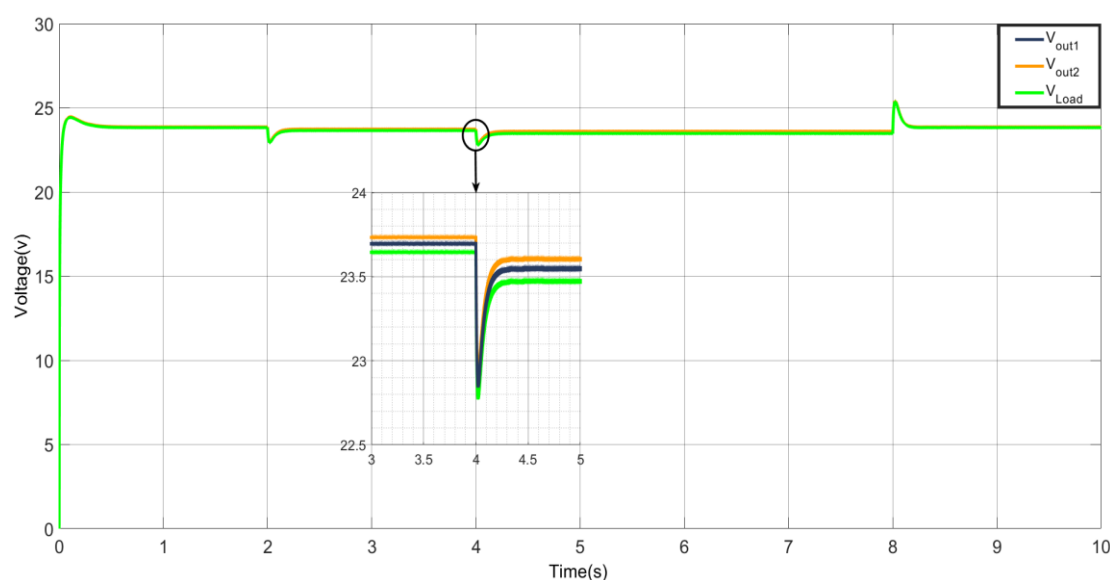
آزمایش دوم: بررسی عملکرد روش کنترل اف‌تی با امپدانس‌های خط نابرابر

در آزمایش قبل مشاهده شده که روش کنترل اف‌تی با امپدانس‌های خط برابر می‌تواند تقسیم بار صحیح در ریزش‌بکه DC را برقرار کند اما این کار را با ایجاد افت ولتاژ خروجی در واحدهای DG انجام می‌دهد. بنابراین با استفاده از روش کنترل اف‌تی هیچ‌گاه ولتاژ باس DC به مقدار نامی بازیابی نخواهد شد.

در آزمایش دوم، امپدانس خط واحد DG اول برابر ۰/۱ و امپدانس خط واحد DG دوم برابر ۰/۲ قرار داده شده است تا عملکرد روش کنترل اف‌تی با امپدانس‌های خط نابرابر نیز مورد بررسی قرار گیرد. همان‌طور که در شکل (۵-۳-الف) مشاهده می‌شود، روش کنترل اف‌تی در ریزش‌بکه DC با امپدانس‌های خط نابرابر نمی‌تواند تقسیم بار صحیح را برقرار کند، بنابراین ریزش‌بکه DC همواره با خطای تقسیم بار مواجه خواهد بود. علاوه بر این روش کنترل اف‌تی همواره سعی دارد با ایجاد افت ولتاژ مجازی برای هر واحد DG، خطای تقسیم جریان را از بین ببرد که این موضوع خود منجر به افت ولتاژ در خروجی مبدل‌های افزایشنده و در نتیجه افت ولتاژ بار می‌شود که این مقدار افت ولتاژ (حدود دو درصد) در شکل (۵-۳-ب) قابل مشاهده است.



(الف)

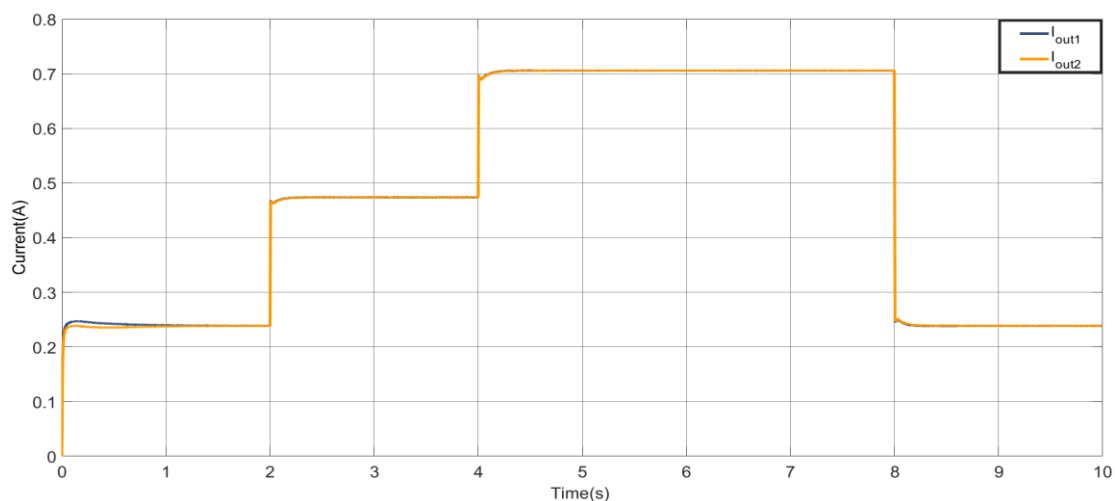


(ب)

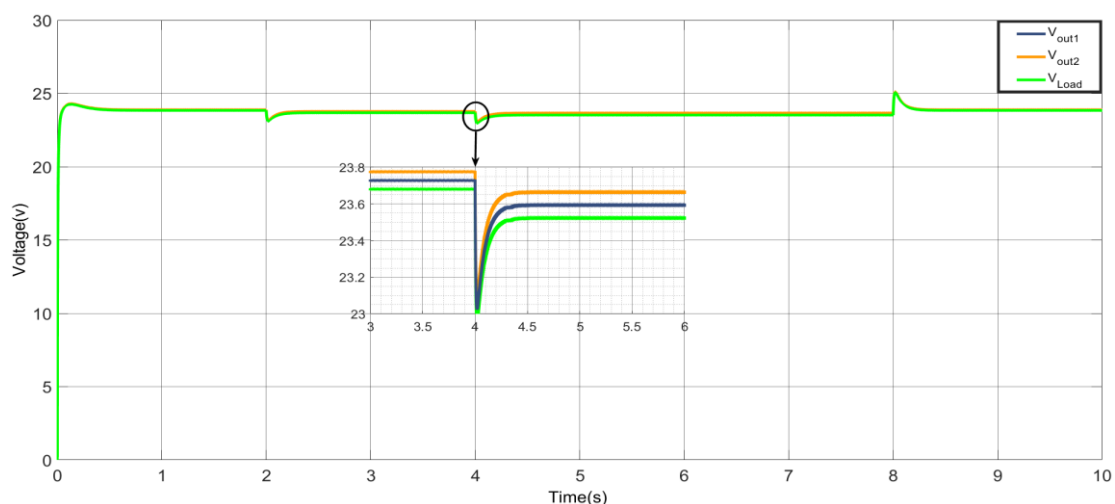
شکل ۳-۵. نتایج آزمایش دوم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با کنترل افتی. الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

آزمایش سوم: بررسی عملکرد روش کنترل توزیع‌شده ارائه‌شده در مرجع [۳۶]

در مرجع [۳۶] از کنترل افتی با ضریب افتی تطبیقی استفاده شده است که ضریب‌های افتی به صورت لحظه‌ای و با توجه به خطای تقسیم جریان در ریزشبكة DC محاسبه می‌شوند. در این مرجع یک ریزشبكة DC شامل سه واحد DG در نرم افزار MATLAB/Simulink طراحی شده است که واحدهای تولید پراکنده در آن با استفاده از مبدل کاهنده، بار را تغذیه می‌کنند.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۵. نتایج آزمایش سوم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در مرجع [۳۶]). (الف) جریان‌های خروجی؛ (ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

نتایج حاصل از بکارگیری روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در مرجع [۳۶] در ریزشبه DC موردنظر این پایان‌نامه و تاثیر آن بر بهبود عملکرد کنترل افی در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۵الف) مشاهده می‌شود، این روش می‌تواند تقسیم جریان صحیح بین واحدهای DG ریزشبه را با وجود امپدانس‌های خط نابرابر و تغییرات بار فراهم آورد اما باتوجه به شکل (۴-۵ب)، روش پیشنهادی در این مرجع در بازیابی ولتاژ باس DC به مقدار نامی ناتوان است چراکه افت ولتاژ ناشی از کنترل افی و افت ولتاژ ناشی از تلفات خط انتقال درنظر گرفته نشده است. در حالت

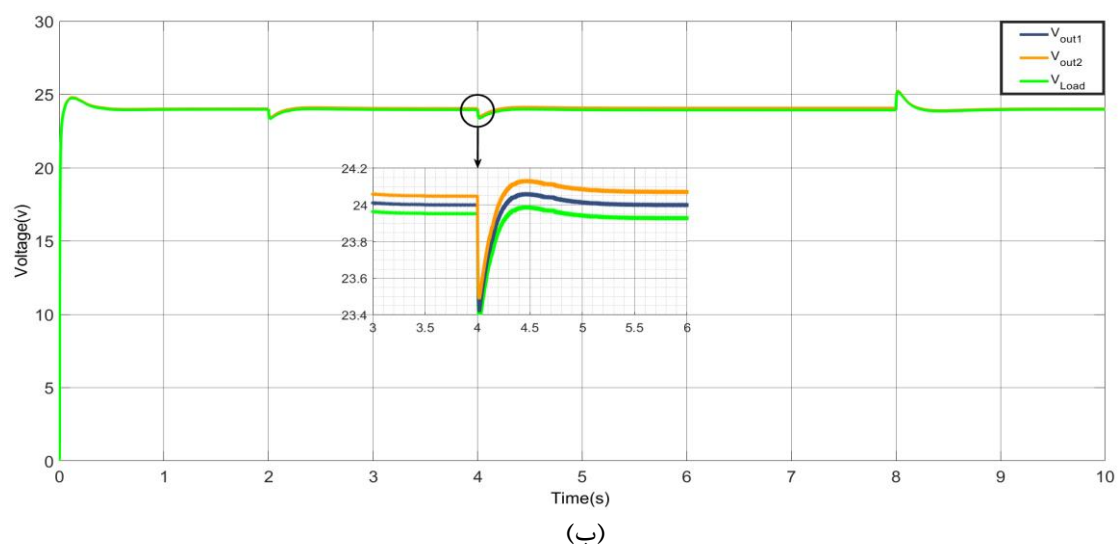
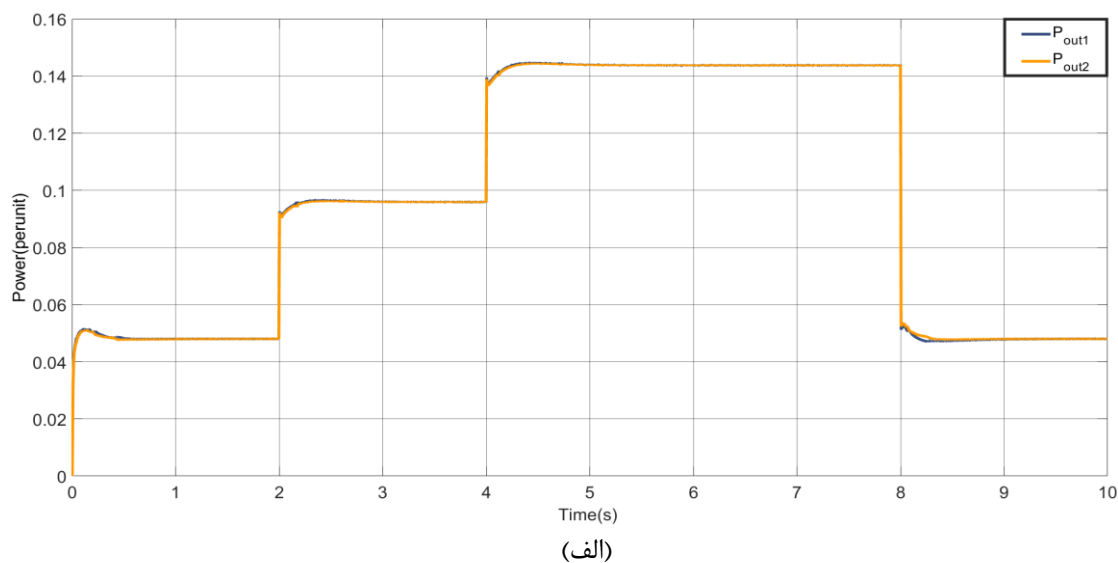
بارگذاری سنگین این آزمایش حدود دو درصد انحراف ولتاژ بار مشاهده می‌شود. در حقیقت آزمایش سوم و چهارم، تکرار آزمایش دوم هستند، با این تفاوت که در آزمایش سوم از روش کنترل توزیع شده در مرجع [۳۶] و در آزمایش چهارم از روش کنترل توزیع شده در مرجع [۳۷] استفاده شده است تا مزایا و معایب روش‌های پیشنهادی در این مراجع و تاثیر آن‌ها بر عملکرد کنترلی ریزشبکه DC بیشتر مورد بررسی قرار گیرند.

آزمایش چهارم: بررسی عملکرد روش کنترل توزیع شده ارائه شده در مرجع [۳۷]

در مرجع [۳۷] یک روش کنترل توزیع شده برای دستیابی به تقسیم توان صحیح و بهبود بازیابی ولتاژ باس DC ارائه شده است. در روش پیشنهادی از اطلاعات توان میانگین و ماکزیمم افت ولتاژ خروجی برای تنظیم ولتاژ مرجع هر واحد DG استفاده شده است. در این مرجع یک ریزشبکه DC شامل سه واحد DG در نرم افزار PSIM 9.0.2 طراحی شده است که واحدهای تولید پراکنده در آن با استفاده از مبدل کاهنده، بار را تغذیه می‌کنند.

نتایج حاصل از بکارگیری روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در مرجع [۳۷] در ریزشبکه DC موردنظر این پایان‌نامه و تاثیر آن بر بهبود عملکرد کنترل اکتی در شکل (۴-۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۷-الف) مشاهده می‌شود، این روش می‌تواند تقسیم توان صحیح بین واحدهای DG ریزشبکه را فراهم آورد اما باتوجه به شکل (۴-۷-ب)، روش پیشنهادی در این مرجع در بازیابی ولتاژ باس DC به مقدار نامی ناتوان است و در بارگذاری سنگین انحراف ولتاژ بار حدود ۰/۴ درصد مشاهده می‌شود.

یکی دیگر از معایب روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در مرجع [۳۶] و [۳۷] نیاز به سیستم ارتباطی سراسری است. برای اجرای این روش‌ها باید تمام واحدهای DG ریزشبکه DC با یکدیگر ارتباط داشته باشند. همان‌طور که گفته شد، از طرفی این نوع سیستم ارتباطی قابلیت اطمینان ریزشبکه DC را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر منجر به افزایش هزینه‌ها خواهد شد.



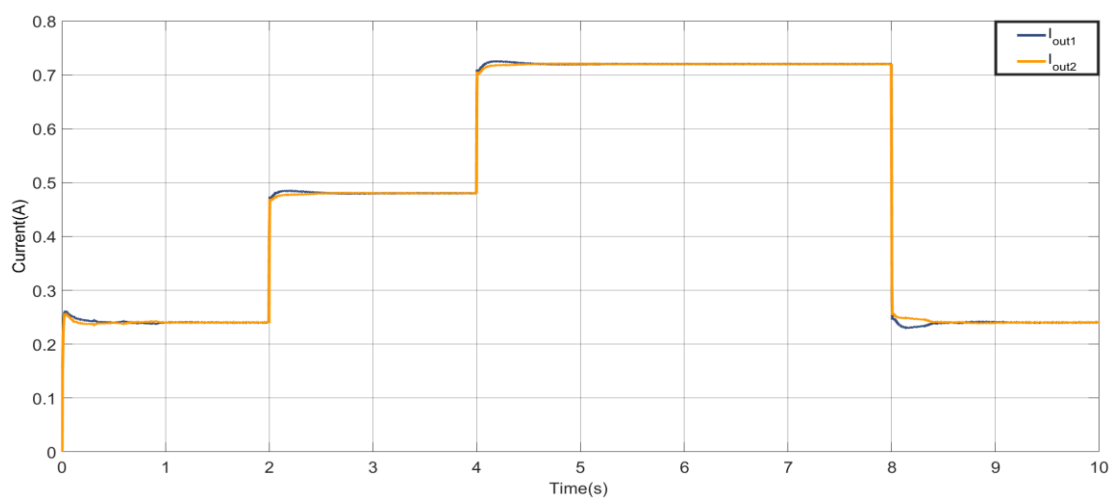
شکل ۵-۵. نتایج آزمایش چهارم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در مرجع [۳۷]). (الف) توان‌های خروجی؛ (ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

۵-۳-۲ بررسی کارایی روش کنترلی پیشنهادی در ریزش‌بکه DC

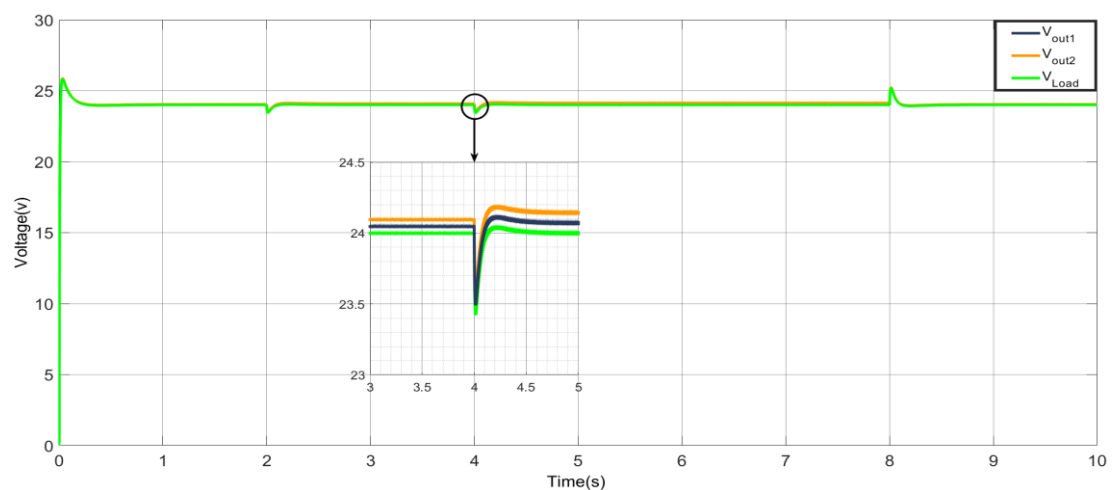
در این بخش عملکرد روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی این پایان‌نامه در ریزش‌بکه DC با چندین آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا تاثیر روش پیشنهادی بر ریزش‌بکه DC طراحی شده در آزمایش دوم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. سپس این ریزش‌بکه DC در دو آزمایش متفاوت با بار توان ثابت مورد بررسی قرار می‌گیرد تا تاثیر مخرب بار توان ثابت بر ریزش‌بکه DC و عملکرد مناسب روش کنترلی پیشنهادی مشاهده شود. در نهایت یک ریزش‌بکه DC با چهار واحد DG و امپدانس‌های خط متفاوت

طراحی می‌شود و عملکرد روش کنترل پیشنهادی ضمن تغییرات بار اهمی، توان ثابت و همچنین با قطع سیستم ارتباطی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

آزمایش پنجم: بررسی عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در ریزش شبکه DC با بار اهمی
در آزمایش دوم مشاهده شد که روش کنترل افقی نمی‌تواند به تنهایی در یک ریزش شبکه DC کارایی لازم را داشته باشد و دستیابی به اهداف تقسیم بار صحیح و تنظیم ولتاژ باس DC با این روش کنترلی در ریزش شبکه DC با امپدانس‌های خط متفاوت غیرممکن است.



(الف)



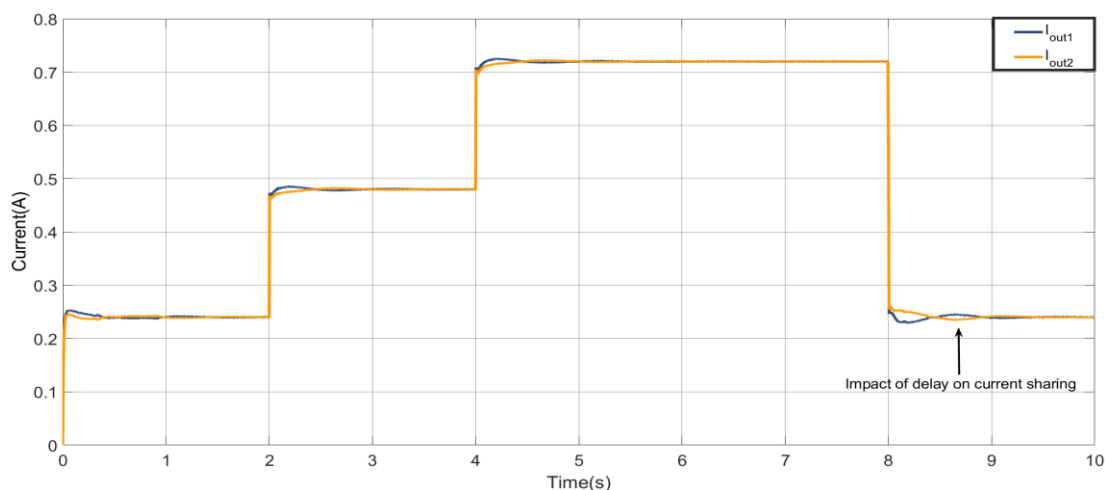
(ب)

شکل ۵-۶. نتایج آزمایش پنجم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). (الف) جریان‌های خروجی؛ (ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

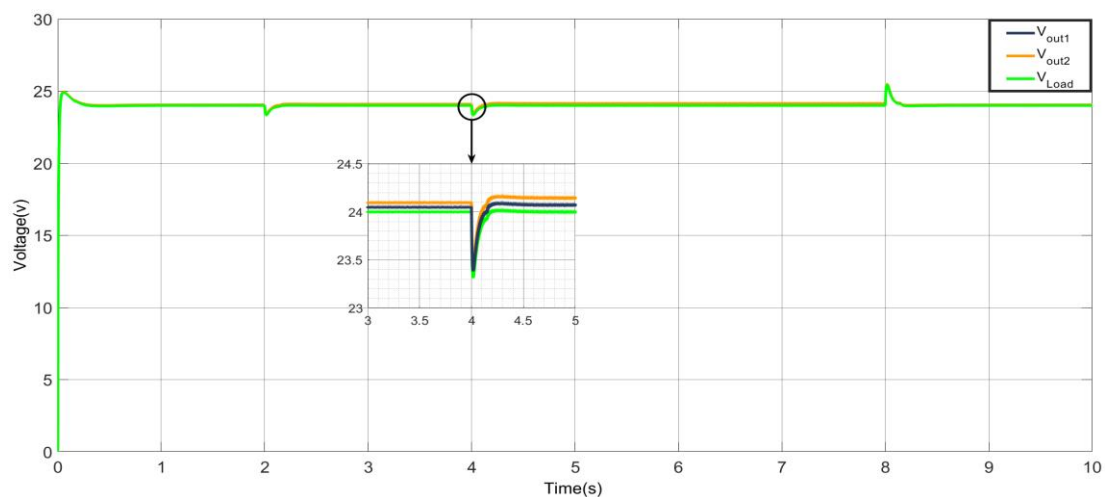
در این آزمایش و در راستا بهبود عملکرد کنترلی ریزشبكة DC، از روش کنترل توزیع شده پیشنهادی که در فصل قبل ارائه شد، استفاده شده است. عملکرد مطلوب روش کنترلی پیشنهادی در ریزشبكة DC با امیدانس های خط متفاوت و به ازاء تغییرات بار در شکل (۵-۶) قابل مشاهده است. همان طور که در شکل (۵-۶-الف) مشاهده می شود، تقسیم بار صحیح بین واحدهای DG حتی با تغییرات بار نیز ایجاد شده است و بازیابی ولتاژ بار به مقدار نامی نیز با وجود تغییرات بار و در نتیجه تغییرات جریان بار که خود منجر به تغییر افت ولتاژ در خطوط انتقال خواهد شد، به خوبی انجام شده است. همان طور که در شکل (۵-۶-ب) مشاهده می شود، ولتاژ باس DC پس از تغییرات بار دقیقاً به مقدار نامی بازیابی می شود.

در فصل قبل به بررسی تاثیر تاخیر در انتقال اطلاعات بر پایداری ریزشبكة DC پرداخته شد. در اینجا نیاز است تا اثر این پارامتر بر اهداف کنترلی ریزشبكة DC شامل تقسیم جریان صحیح و تنظیم ولتاژ باس DC دقیق مورد بررسی قرار گیرد.

در این راستا آزمایش قبل تکرار می شود، اما این بار تاخیر ۱۵۰ میلی ثانیه در انتقال اطلاعات بین دو واحد تولید پراکنده در نظر گرفته شده است تا تاثیر این مقدار تاخیر بر عملکرد کنترلی ریزشبكة DC مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. همان طور که در شکل (۵-۷-الف) مشاهده می شود، خطای تقسیم جریان در مدت زمان بیشتری نسبت به آزمایش قبل در ریزشبكة DC باقی می ماند چرا که اطلاعات مورد نیاز برای اجرای روش کنترل توزیع شده پیشنهادی با تاخیر ۱۵۰ میلی ثانیه ارسال شده است. اما در نهایت خطای تقسیم جریان از بین می رود و این نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی در این پایان نامه است. یکی دیگر از مزایای این روش عدم تاثیر تاخیر در سیستم ارتباطی بر تنظیم ولتاژ بار است. همان طور که در شکل (۵-۷-ب) مشاهده می شود، ولتاژ باس DC در طول آزمایش همواره برابر با مقدار نامی است و نتایج با آزمایش قبل تفاوتی ندارد. بنابراین می توان گفت تاخیر در سیستم ارتباطی تنها می تواند بر تقسیم بار صحیح بین واحدهای تولید پراکنده اثرگذار باشد و تنظیم ولتاژ بار حتی با وجود تاخیر در انتقال اطلاعات نیز به خوبی انجام می شود.



(الف)

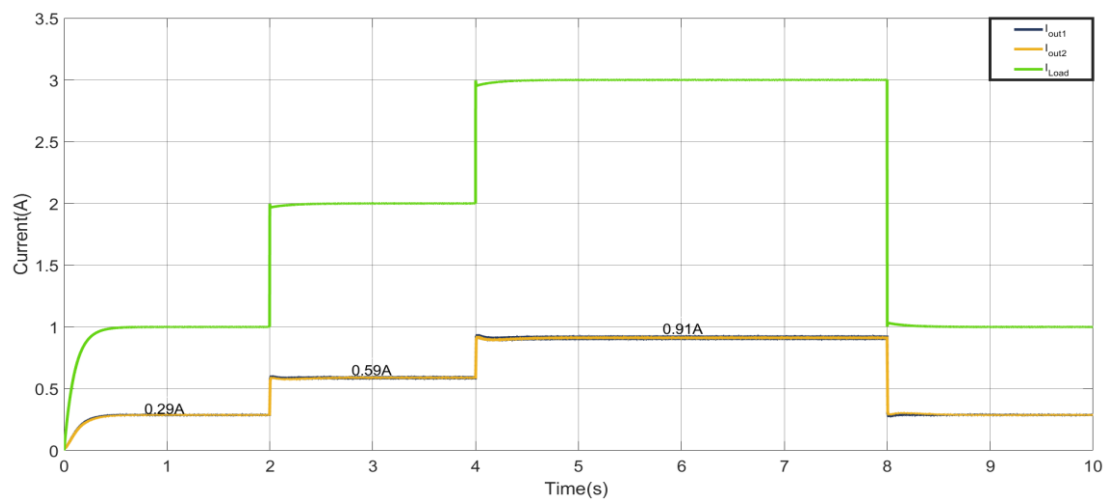


(ب)

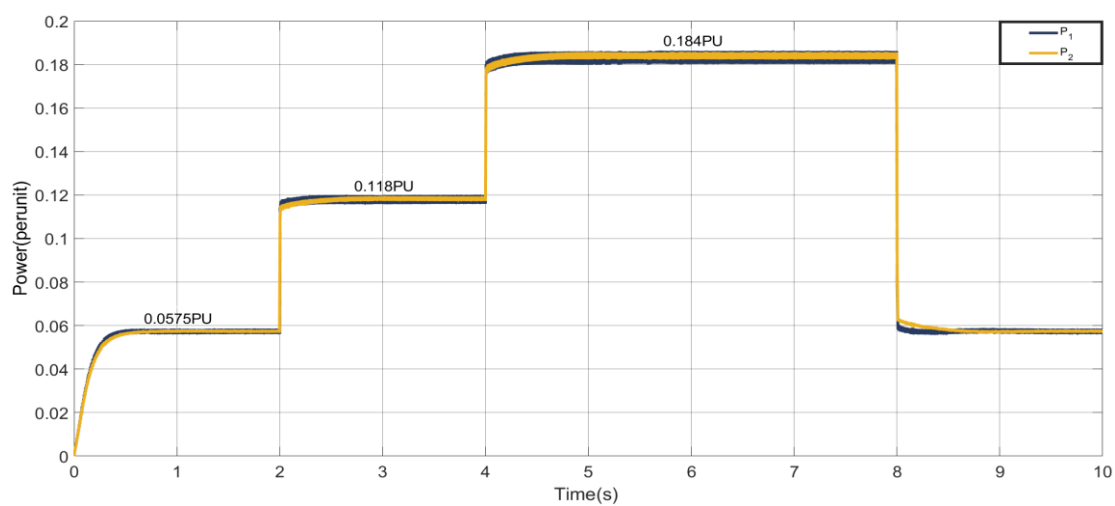
شکل ۵-۷. نتایج آزمایش پنجم برای بار اهمی، امپدانس‌های خط نابرابر و تاخیر ۱۵۰ میلی ثانیه با (روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در سطح ثانویه). (الف) جریان‌های خروجی؛ (ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

آزمایش ششم: بررسی عملکرد روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در ریزشبه DC با بار توان ثابت (حالت اول با ولتاژ نامی ۲۴ ولت)

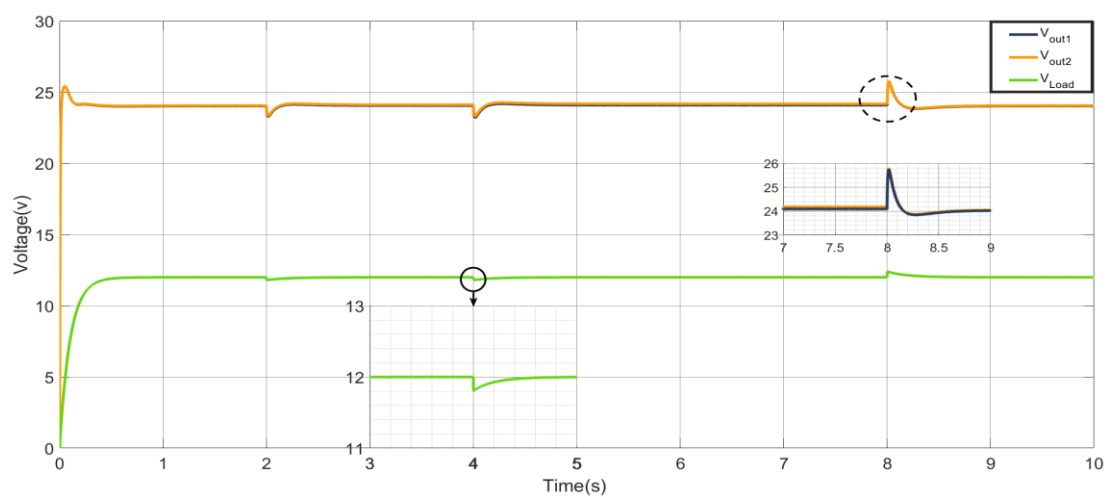
در آزمایش ششم و هفتم از یک مبدل کاهنده و بار اهمی به منظور شبیه‌سازی بار توان ثابت استفاده شده است که توسط ریزشبه DC طراحی‌شده تغذیه می‌شود. در این دو آزمایش کارایی روش کنترلی پیشنهادی به ازاء تغییرات بار توان ثابت مورد بررسی قرار می‌گیرد. زمان انجام هر دو آزمایش ۱۰ ثانیه می‌باشد و تغییرات مقدار بار در طول زمان آزمایش در جدول (۵-۳) ارائه شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵-۸. نتایج آزمایش ششم برای بار توان ثابت و امپدانس‌های خط نابرابر با روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی و جریان بار؛ ب) توان‌های خروجی؛ ج) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

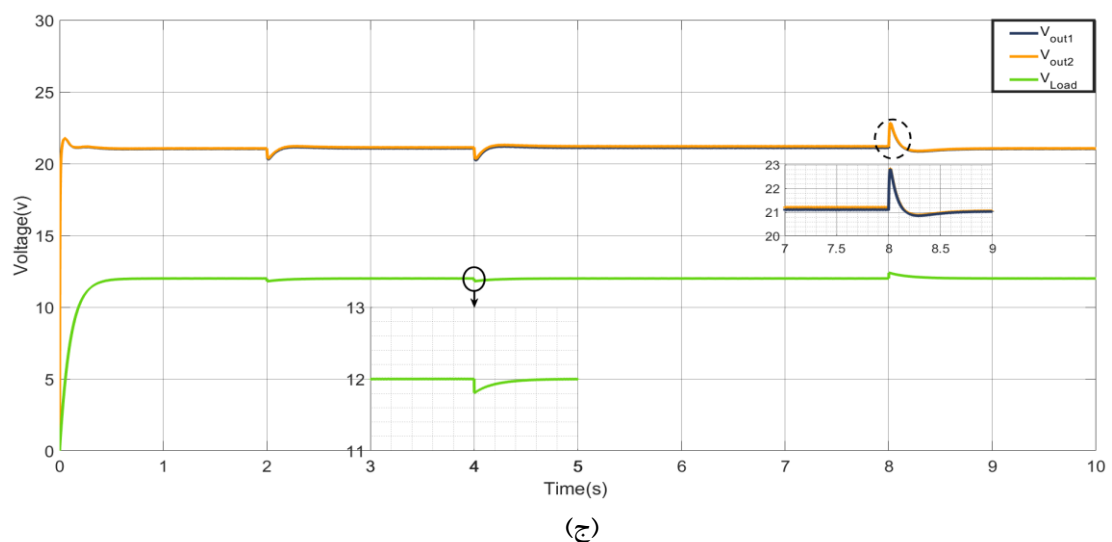
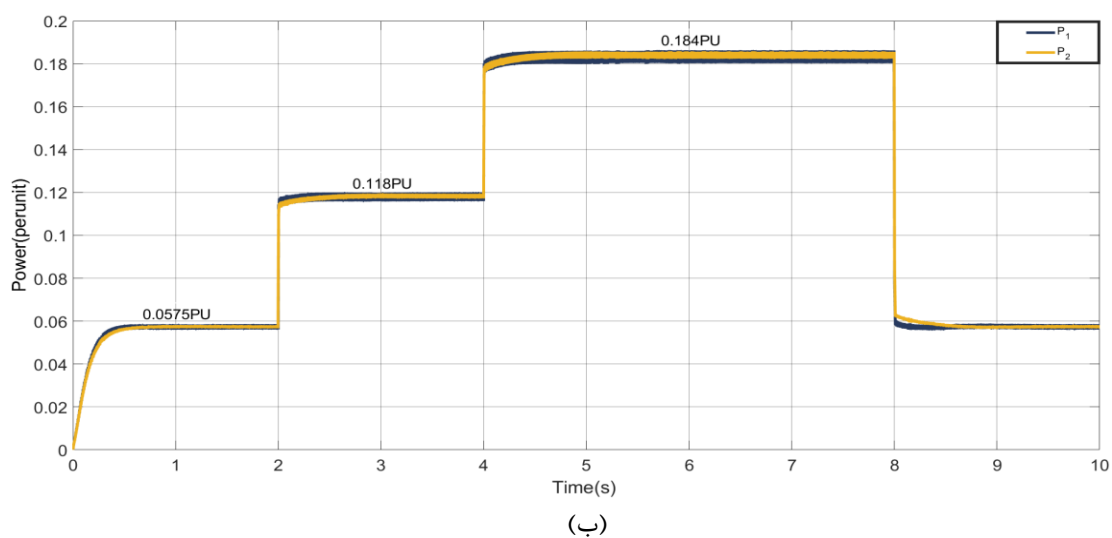
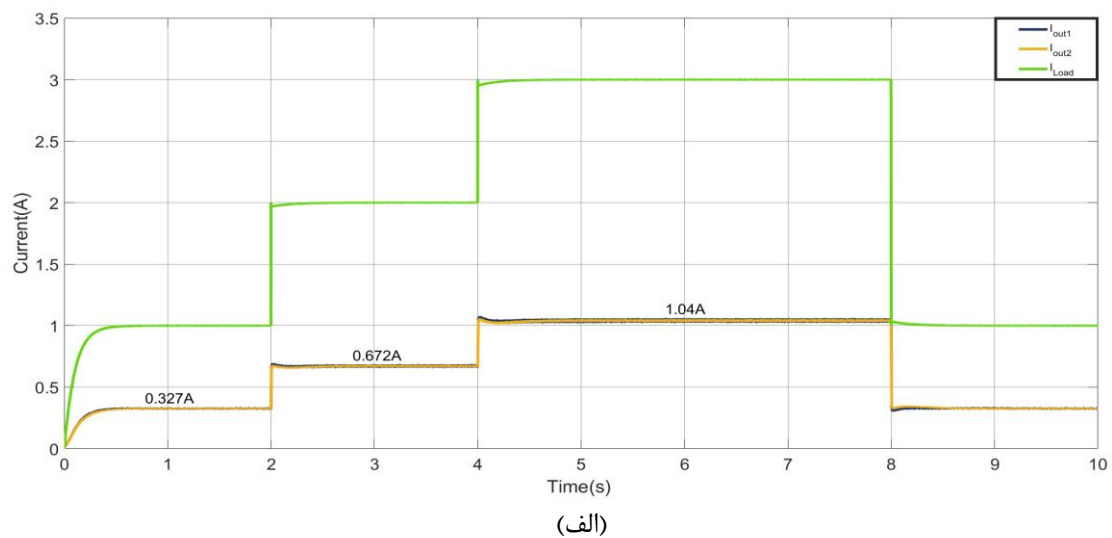
همان‌طور که گفته شد، از دید باس DC، مبدل‌ها رفتاری شبیه به بار توان ثابت از خود نشان می‌دهند چرا که تمایل دارند توان بار متصل به خود را حتی با وجود نوسانات ولتاژ و جریان، ثابت نگه دارند. بارهای توان ثابت با داشتن مشخصات غیرخطی می‌توانند در شرایط خاص منجر به ناپایداری ولتاژ در باس DC شود.

همان‌طور که در شکل (۵-۸-الف) و (۵-۸-ج) مشاهده شد، روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در زمان تغییرات بار توان ثابت می‌تواند تقسیم بار صحیح بین واحدهای DG را برقرار و همچنین ولتاژ باس DC را به مقدار نامی بازیابی کند، بنابراین این روش کارایی لازم در زمان تغذیه بارهای توان ثابت را دارد.

آزمایش هفتم: بررسی عملکرد روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در ریزشبکه DC با بار توان ثابت (حالت دوم با ولتاژ نامی ۲۱ ولت)

این آزمایش در حقیقت تکرار آزمایش ششم است، با این تفاوت که در این آزمایش مقدار ۳ ولت افت ولتاژ مجاز در باس DC ایجاد شده است تا اثر مخرب بار توان ثابت در ریزشبکه DC مورد بررسی قرار گیرد. همان‌طور که در شکل (۵-۹-الف) مشاهده می‌شود، تقسیم بار صحیح بین واحدهای DG برقرار است و تنها مقدار جریان‌های خروجی نسبت به آزمایش قبل کمی افزایش پیدا کرده است. با توجه به شکل (۵-۹-ج)، می‌توان گفت چنانچه به هر دلیلی مقدار ولتاژ بار یا همان ولتاژ باس DC کاهش پیدا کند، بار توان ثابت با افزایش جذب جریان، آن افت ولتاژ را جبران می‌کند که این موضوع در بارهای اهمی مشاهده نمی‌شود، چرا که جریان در بارهای اهمی با کاهش ولتاژ، کاهش پیدا خواهد کرد.

همان‌طور که در شکل (۵-۸-ب) و (۵-۹-ب) مشاهده می‌شود، مقدار توان پریونیت خروجی واحدهای DG در دو آزمایش یکسان است و این موضوع نشان می‌دهد که چنانچه ولتاژ باس DC افت کند، بار توان ثابت با افزایش جذب جریان از خروجی واحدهای DG باز هم توان یکسان از ریزشبکه DC می‌کشد و این موضوع می‌تواند در بارهای بزرگتر منجر به ناپایداری ولتاژ در باس DC شود.



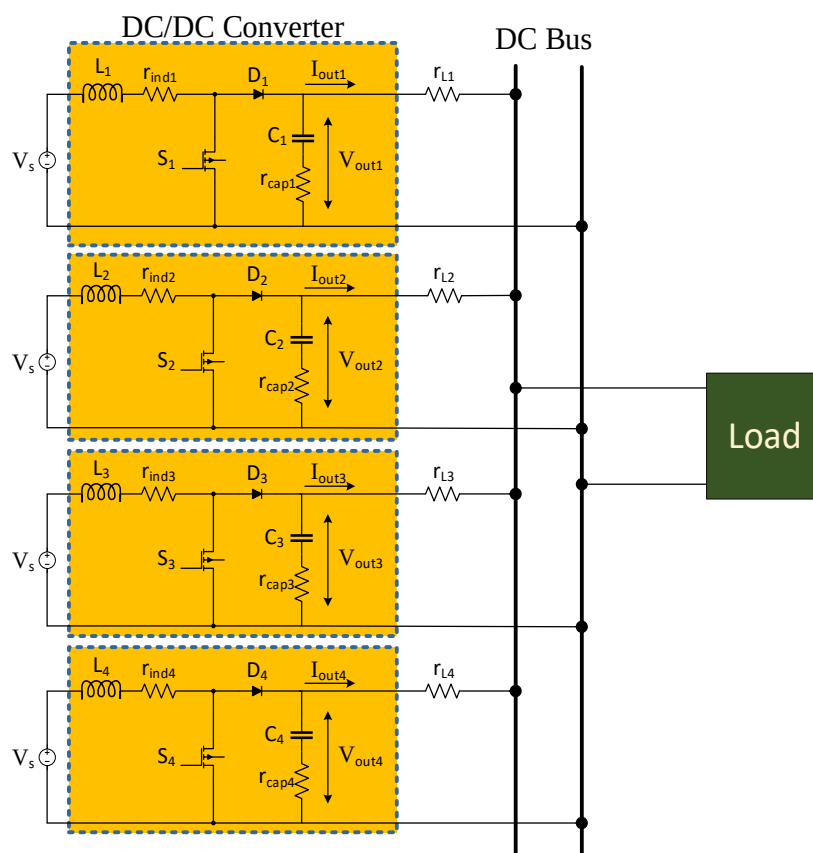
شکل ۵-۹. نتایج آزمایش هفتم برای بار توان ثابت و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی و جریان بار؛ ب) توان‌های خروجی؛ ج) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

آزمایش هشتم: بررسی عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در ریزشبه DC با چهار واحد DG (با بار اهمی)

در این آزمایش، یک ریزشبه DC با چهار واحد DG طراحی شده است تا عملکرد روش کنترلی پیشنهادی و همچنین سیستم ارتباطی مورد نیاز در سیستم‌های بزرگتر نیز مورد بررسی قرار گیرد. ریزشبه DC تحت آزمایش در شکل (۵-۱۰) قابل مشاهده است. در این آزمایش جریان نامی خروجی در واحدهای اول و سوم برابر ۱۰ آمپر و جریانی واحدهای دوم و چهارم برابر ۵ آمپر قرار داده شده است. با توجه به رابطه ارائه شده برای محاسبه ضریب افتی و جریانی‌های نامی واحدها:

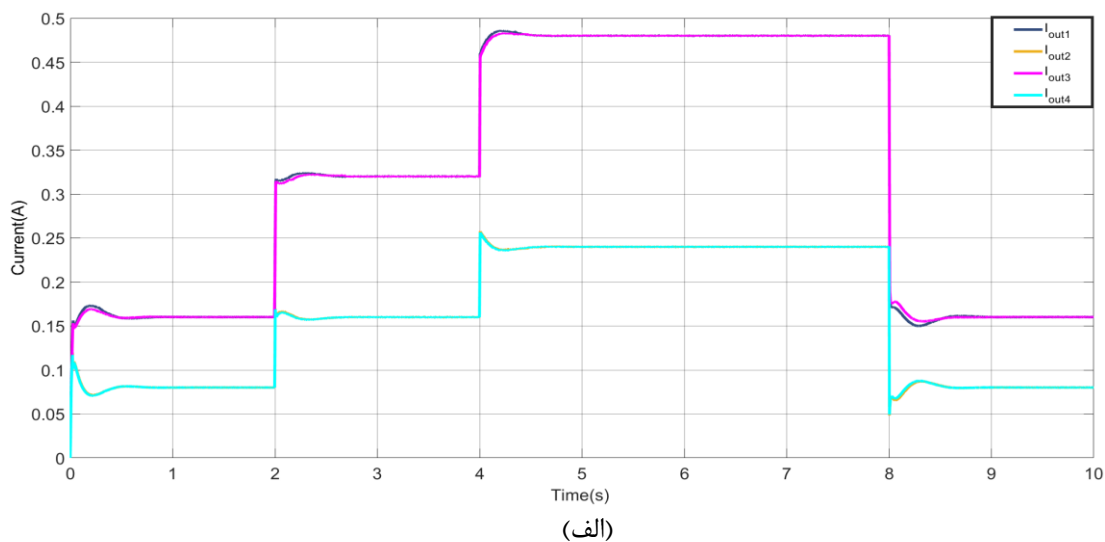
$$R_{d1} = R_{d3} = \frac{V_{nom} - V_{min}}{I_{n1}} = \frac{24 - 21}{10} = \frac{3}{10} = 0.3$$

$$R_{d2} = R_{d4} = \frac{V_{nom} - V_{min}}{I_{n2}} = \frac{24 - 21}{5} = \frac{3}{5} = 0.6$$

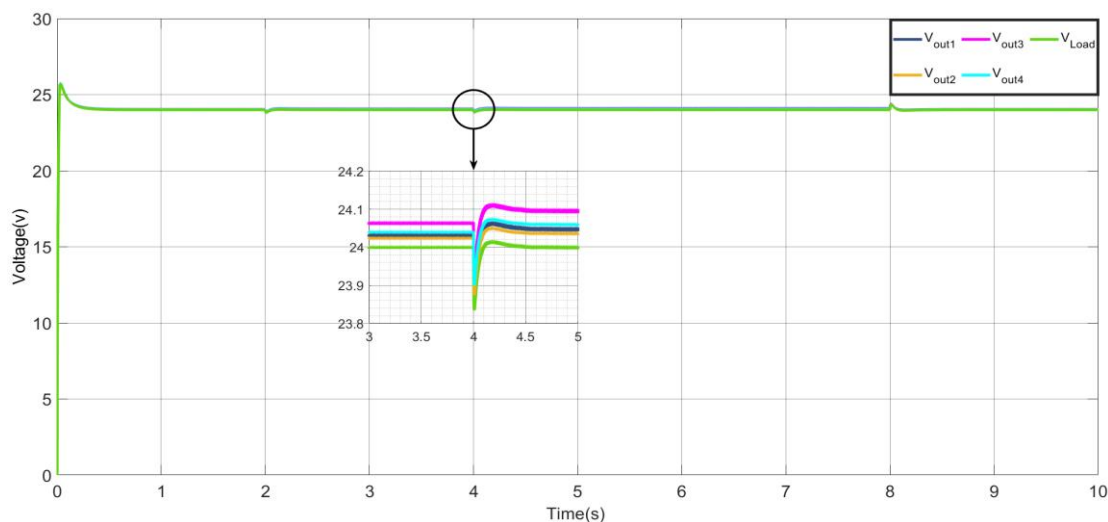


شکل ۵-۱۰. ریزشبه DC با چهار واحد DG

همان‌طور که در شکل (۵-۱۱-الف) مشاهده می‌شود، روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در شرایط این آزمایش می‌تواند به دقت تقسیم بار صحیح بین واحدهای تولید پراکنده را برقرار کند. همچنین در شکل (۵-۱۱-ب) مشاهده می‌شود که ولتاژ باس DC در طول این آزمایش همواره با مقدار نامی برابر می‌باشد و تنها در زمان تغییرات بار با انحراف ولتاژ محدود و گذرا روبه‌رو است که این مقدار قابل چشم‌پوشی است. بنابراین روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی از کارایی مناسبی در ریزشبکه DC با چهار واحد تولید پراکنده که مشخصات متفاوتی نسبت به یکدیگر دارند، برخوردار است.



(الف)

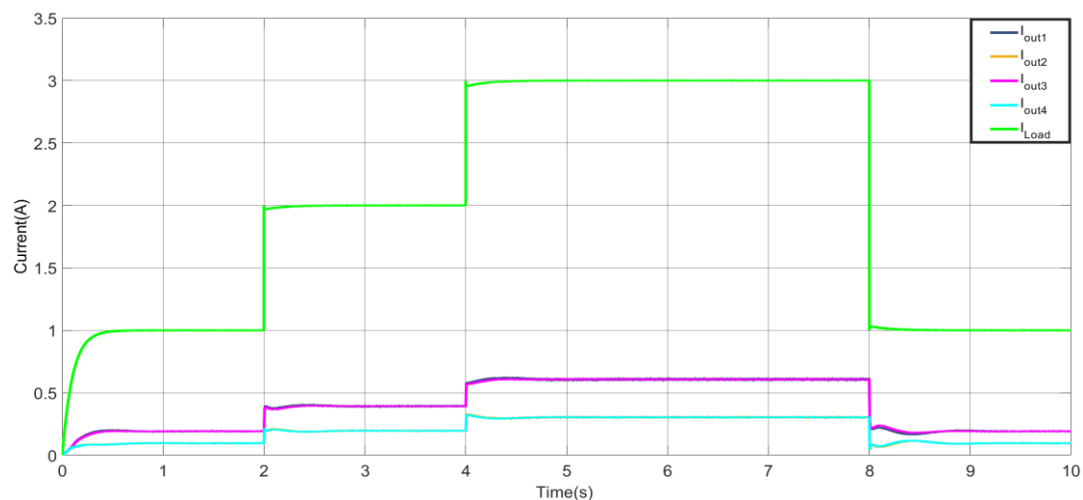


(ب)

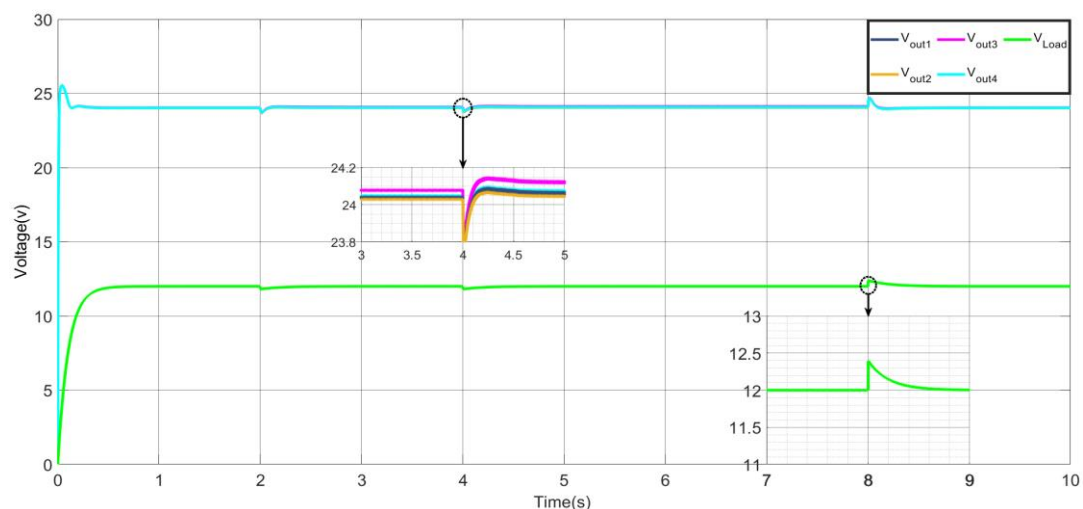
شکل ۵-۱۱. نتایج آزمایش هشتم برای بار اهمی و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در سطح ثانویه). الف) جریان‌های خروجی؛ ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

آزمایش نهم: بررسی عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در ریزشبه DC چهار واحدی (با بار توان ثابت)

هدف از این آزمایش بررسی عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در یک ریزشبه DC با چهار واحد DG با بار توان ثابت است. نتایج این آزمایش و آزمایش‌های ششم و هفتم نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در مواجهه با بار توان ثابت است. نتایج این آزمایش در شکل (۵-۱۲) قابل مشاهده است.



(الف)

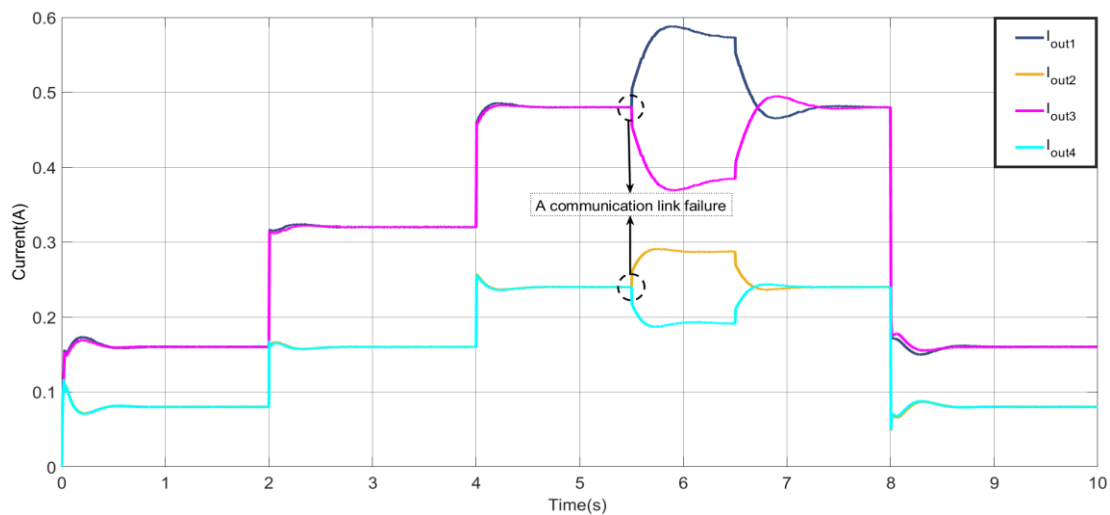


(ب)

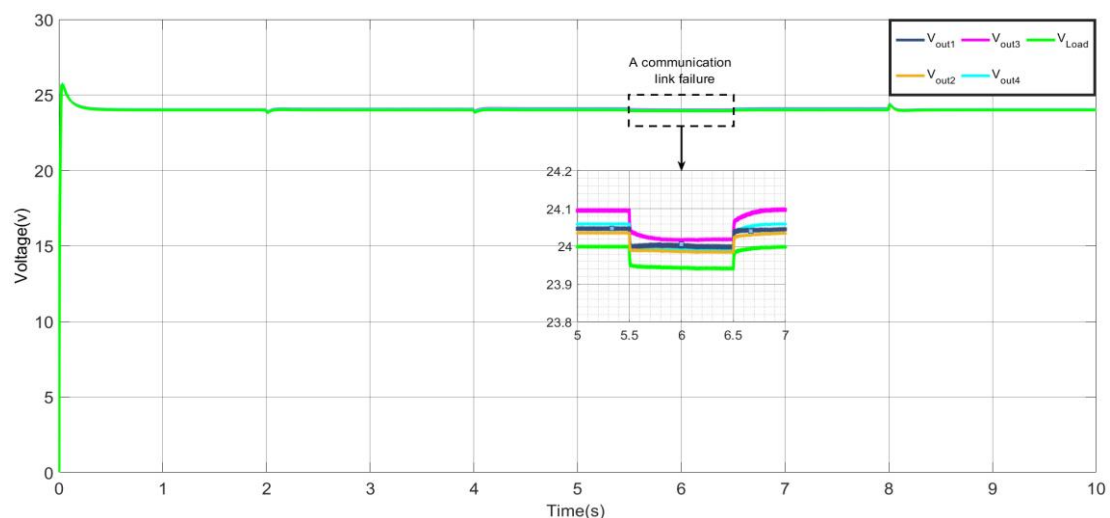
شکل ۵-۱۲. نتایج آزمایش نهم برای بار توان ثابت و امپدانس‌های خط نابرابر با (روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه). (الف) جریان‌های خروجی؛ (ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

آزمایش دهم: بررسی عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در زمان قطع یکی از سیستم‌های ارتباطی (با بار اهمی)

هدف از این آزمایش بررسی اثر قطع احتمالی سیستم‌های ارتباطی بر عملکرد روش کنترلی پیشنهادی می‌باشد. این آزمایش در حقیقت تکرار آزمایش هشتم است، با این تفاوت که اتصال ارتباطی بین واحد DG سوم و چهارم به مدت یک ثانیه قطع شده است، این خط در ثانیه ۵/۵ رخ می‌دهد که این موضوع در شکل (۵-۱۴) قابل مشاهده است.



(الف)



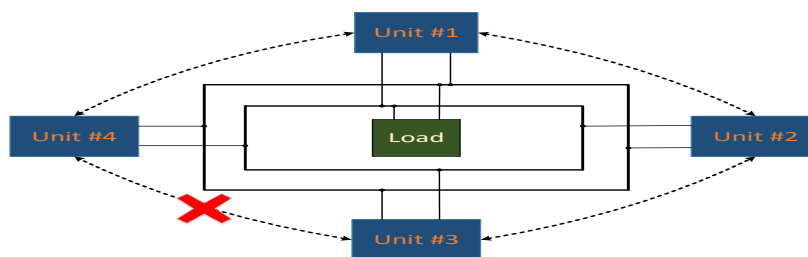
(ب)

شکل ۵-۱۳. نتایج آزمایش دهم برای بار اهمی، امپدانس‌های خط نابرابر و قطع سیستم ارتباطی با روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در سطح ثانویه. (الف) جریان‌های خروجی؛ (ب) ولتاژهای خروجی و ولتاژ بار

همان‌طور که در شکل (۵-۱۳-الف) مشاهده شد، پس از قطع سیستم ارتباطی تقسیم بار بین واحدهای DG با خطا روبه‌رو می‌شود که البته پس از وصل مجدد سیستم ارتباطی، این خطا بلافاصله رفع می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵-۱۳-ب) مشاهده می‌شود، در مدت زمان قطع سیستم ارتباطی، حدوداً افت ولتاژی برابر با ۰/۰۵ ولت در باس DC ایجاد می‌شود که این مقدار قابل چشم‌پوشی بوده و بلافاصله پس از رفع قطعی در سیستم ارتباطی، این افت ولتاژ جبران شده و ولتاژ باس DC به مقدار نامی بازیابی می‌شود.

جدول ۴-۵. پارامترهای واحدهای DG برای ریزش‌بکه DC چهارواحدی

	DG #1	DG #2	DG #3	DG #4
جریان نامی (A)	۱۰	۵	۱۰	۵
مقاومت خط انتقال (Ω)	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵
ضریب افتی	۰/۳	۰/۶	۰/۳	۰/۶
K_{pv}	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵
K_{iv}	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
K_{pi}	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
K_{ii}	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵

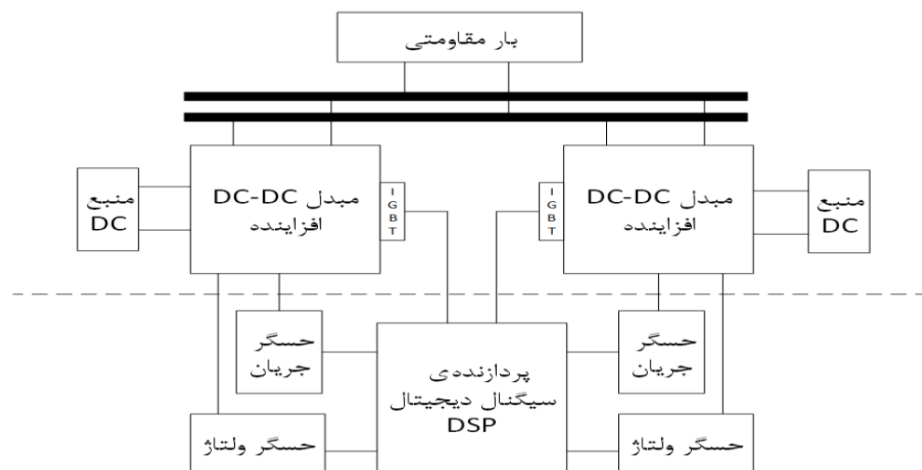


شکل ۵-۱۴. نمایش قطع یکی از سیستم‌های ارتباطی بین واحدهای DG در ریزش‌بکه DC

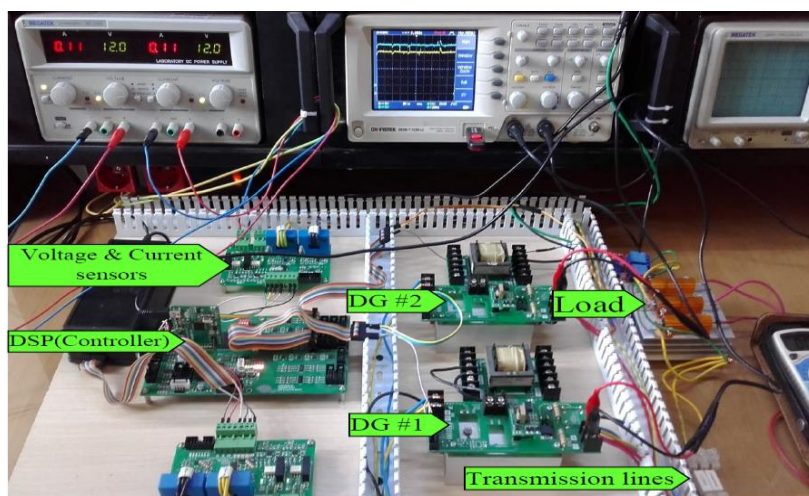
۵-۴ نتایج حاصل از بکارگیری روش پیشنهادی به صورت عملی

برای پیاده‌سازی روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی به صورت عملی و تایید نتایج حاصل از شبیه‌سازی از یک سیستم نمونه آزمایشگاهی شامل دو مبدل DC-DC افزایشنده، منبع تغذیه DC، بار اهمی و برد اندازه‌گیری ولتاژ و جریان استفاده شده است.

روش کنترلی پیشنهادی توسط یک پردازشگر سیگنال دیجیتال DSP/TMS320F28335 اجرا می‌شود که مشخصات فنی آن در قسمت پیوست آمده است. برای برنامه‌نویسی پردازشگر سیگنال دیجیتال موردنظر و اجرای روش کنترلی پیشنهادی از نرم‌افزار Code Composer Studio 7.1.0 استفاده شده است. اطلاعات و مقادیر موردنیاز در جدول (۵-۱) و (۵-۴) ارائه شده‌اند، البته در محیط آزمایشگاه مقادیر امپدانس‌های خط تغییر کرده‌اند که این مقادیر برای واحدهای DG اول و دوم به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۱۵ قرارداد شده‌اند. شماتیک نمونه آزمایشگاهی ریزشبکه DC طراحی شده در شکل (۵-۱۵) و تصویر آن در آزمایشگاه در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده‌اند.

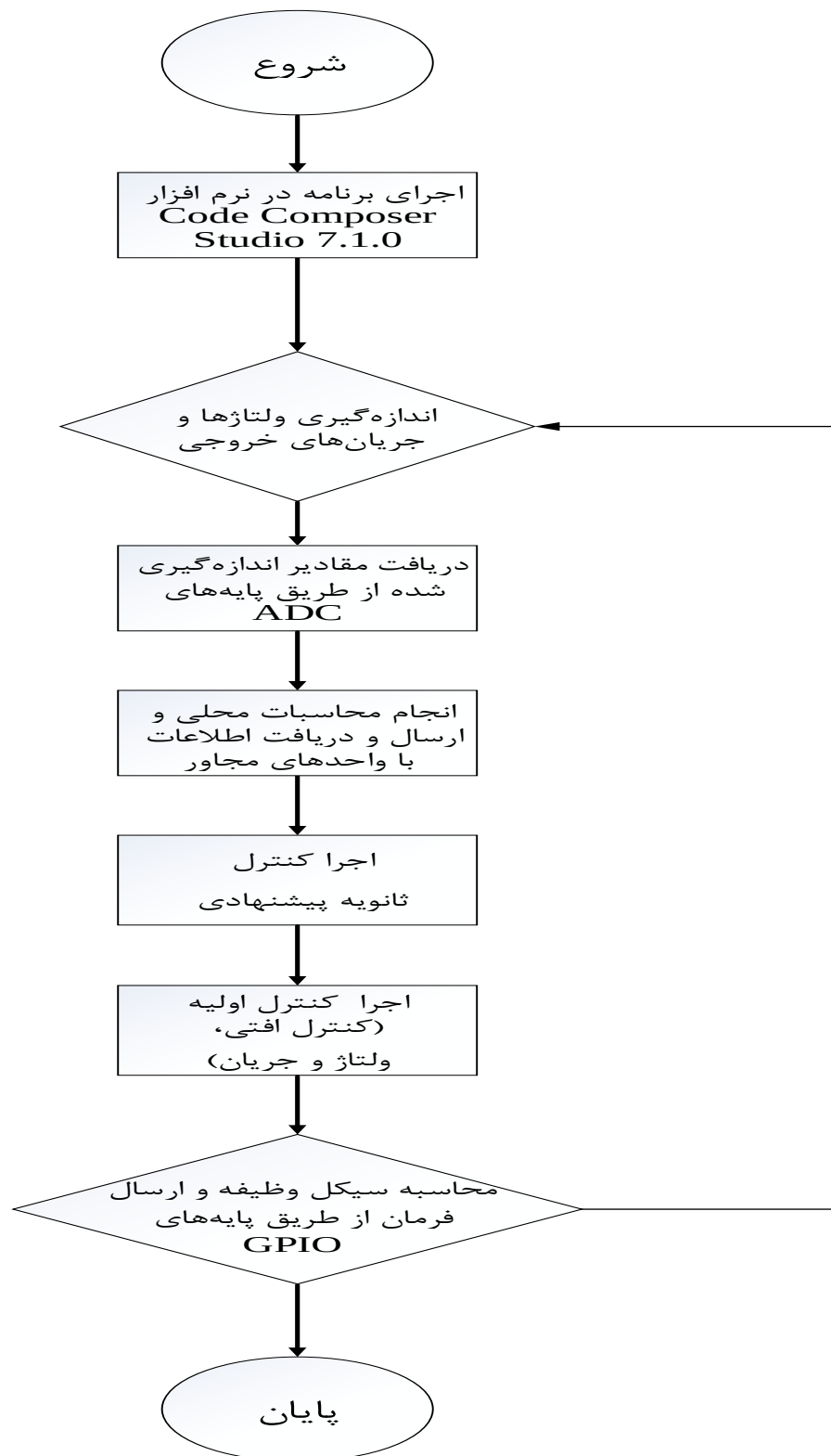


شکل ۵-۱۵. شماتیک نمونه آزمایشگاهی ریزشبکه DC



شکل ۵-۱۶. سیستم نمونه ریزشبکه DC در آزمایشگاه

کلیه مراحل راه‌اندازی ریزشبکه DC در محیط آزمایشگاه در فلوچارت زیر نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۷. فلوچارت عملکرد کنترلی ریزشبکه DC در آزمایشگاه

آزمایش یازدهم: بررسی تاثیر روش کنترل توزیع شده پیشنهادی بر عملکرد کنترلی ریزشبه

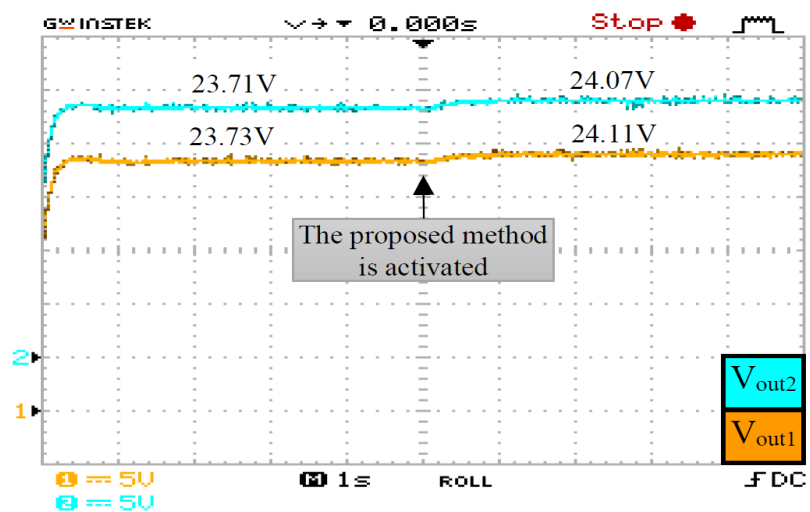
DC در محیط آزمایشگاه

هدف این آزمایش نمایش محدودیت‌های روش کنترل اف‌تی و بهبود عملکرد کنترلی ریزشبه DC به کمک روش کنترل توزیع شده پیشنهادی است. در این آزمایش در ابتدا تنها از کنترل اف‌تی استفاده شده است و پس از ۵ ثانیه روش پیشنهادی فعال می‌شود. بار اهمی در این آزمایش 25Ω است.

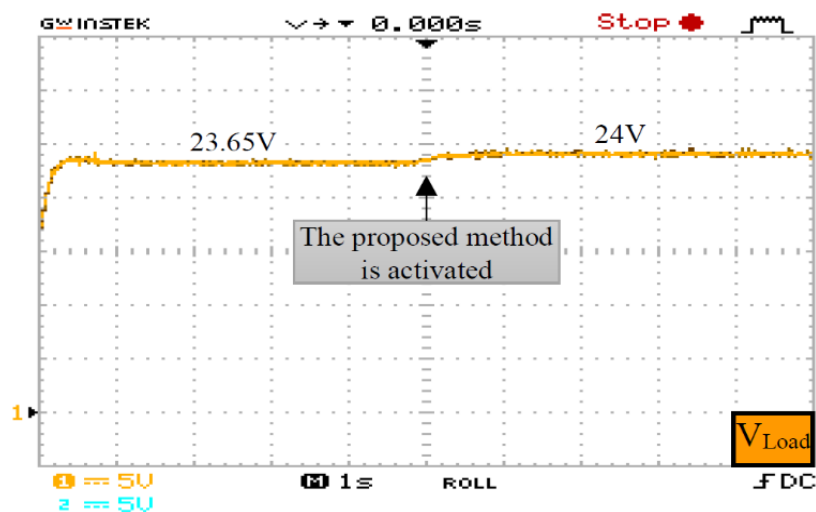
همان‌طور که در شکل (۵-۱۸-الف) مشاهده می‌شود، در ابتدا آزمایش ولتاژهای خروجی واحدهای DG اول و دوم به ترتیب $23/73$ و $23/71$ می‌باشند که این مقادیر کمتر از مقدار ولتاژ نامی مشخص شده برای باس DC است. در این حالت ولتاژ بار برابر با $23/65$ ولت است که این انحراف ولتاژ به دلیل استفاده از کنترل اف‌تی و تلفات خط انتقال است که این موضوع در شکل (۵-۱۸-ب) قابل مشاهده است. همچنین در شکل (۵-۱۸-ج) مشاهده می‌شود که جریان‌های خروجی برابر نیستند که این موضوع نشان‌دهنده خطا در تقسیم جریان است.

پس از اجرای روش کنترل توزیع شده پیشنهادی ولتاژهای خروجی واحدهای DG اول و دوم به ترتیب به مقادیر $24/11$ و $24/07$ اصلاح می‌شوند. در این حالت ولتاژ بار دقیقاً به مقدار مطلوب 24 ولت بازیابی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵-۱۸-ج) مشاهده می‌شود، پس از اجرای روش کنترل توزیع شده پیشنهادی، خطای تقسیم جریان پس از حدود یک ثانیه حذف می‌شود و هر واحد DG دقیقاً مقدار $0/48$ آمپر را برای تغذیه بار به اشتراک می‌گذارد.

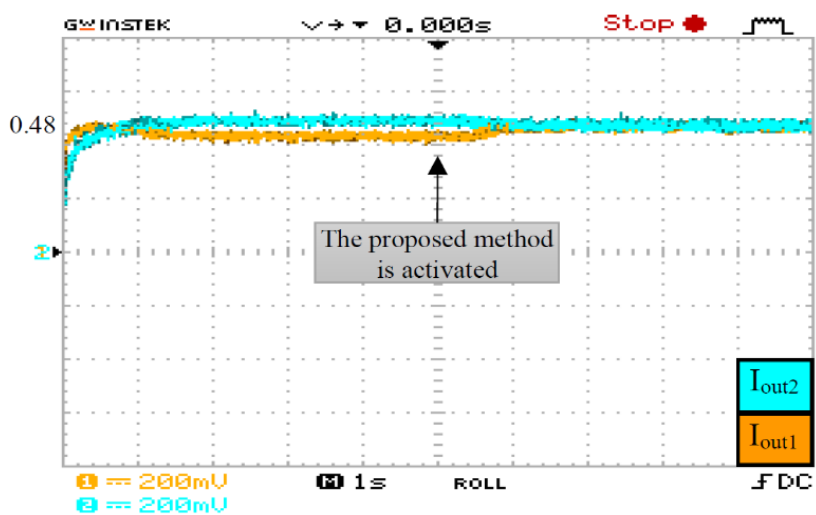
نتایج آزمایش یازدهم و دوازدهم با استفاده از اسیلوسکوپ مدل "GW-instek GDS 1100 U" ذخیره شده‌اند. نتایج آزمایش یازدهم نشان می‌دهند روش کنترل توزیع شده پیشنهادی در بهبود عملکرد کنترلی ریزشبه DC توانمند بوده و به خوبی می‌تواند بر محدودیت‌های کنترل اف‌تی غلبه می‌کند. در آزمایش بعد عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی تحت تغییرات بار اهمی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.



(الف)



(ب)



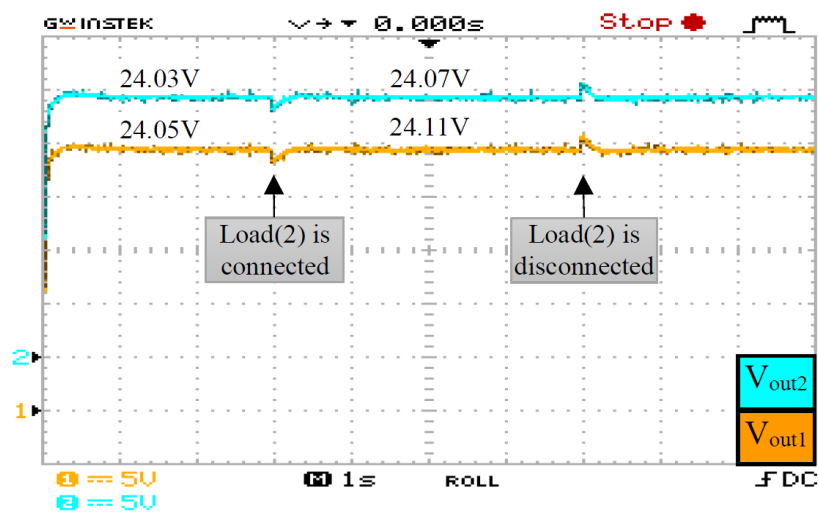
(ج)

شکل ۵-۱۸. نتایج آزمایش یازدهم (در محیط آزمایشگاه). (الف) ولتاژهای خروجی؛ (ب) ولتاژ بار؛ (ج) جریان‌های خروجی

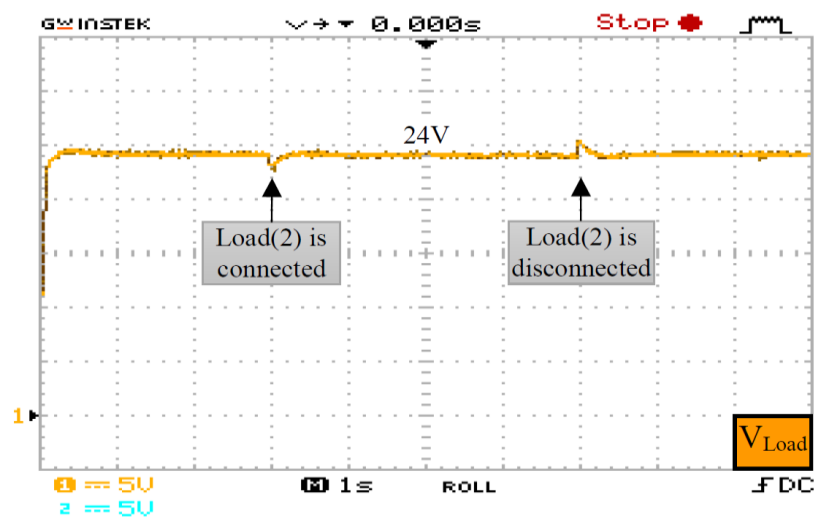
آزمایش دوازدهم: بررسی عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی تحت تغییرات بار اهمی در محیط آزمایشگاه

در این آزمایش عملکرد روش کنترل توزیع شده پیشنهادی تحت تغییرات بار مورد بررسی قرار می-گیرد. در این حالت برخلاف آزمایش قبل، روش کنترل توزیع شده پیشنهادی از ابتدا آزمایش فعال است. در ابتدا دو واحد DG یک بار اهمی ۵۰ اهم را از طریق باس DC تغذیه می کنند. پس از سه ثانیه یک بار مشابه با بار اول وارد مدار شده و پس از چهار ثانیه از مدار خارج می شود. همان طور که در شکل (۵-۱۹-الف) نشان داده شده است، ولتاژهای خروجی واحدهای DG اول و دوم به ترتیب ۲۴/۰۵ و ۲۴/۰۳ هستند و پس از اعمال بار دوم این مقادیر به ترتیب به ۲۴/۱۱ و ۲۴/۰۷ تغییر می کنند. البته در زمان تغییرات بار ولتاژهای خروجی با انحراف ولتاژ جزئی روبه رو می شوند که این انحراف ولتاژ پس از مدت زمان کوتاهی جبران می شوند. ولتاژ بار در تمام مدت زمان آزمایش برابر با مقدار نامی ۲۴ ولت است و تنها در زمان تغییرات بار با انحراف ولتاژ محدود و گذرا روبه رو است که کاملاً قابل چشم پوشی است که این موضوع در شکل (۵-۱۹-ب) قابل مشاهده است. در طول آزمایش دوم که به صورت عملی در محیط آزمایشگاه اجرا شد، خطای تقسیم جریان مشاهده نمی شود و جریان های خروجی همواره برابرند. همان-طور که در شکل (۵-۱۹-ج) مشاهده می شود، تنها در ابتدا آزمایش خطای تقسیم جریان بسیار جزئی وجود دارد و این مقدار خطای تقسیم جریان در زمان تغییرات بار نیز قابل مشاهده است. البته همان طور که گفته شد، این مقدار خطای تقسیم جریان قابل چشم پوشی می باشد.

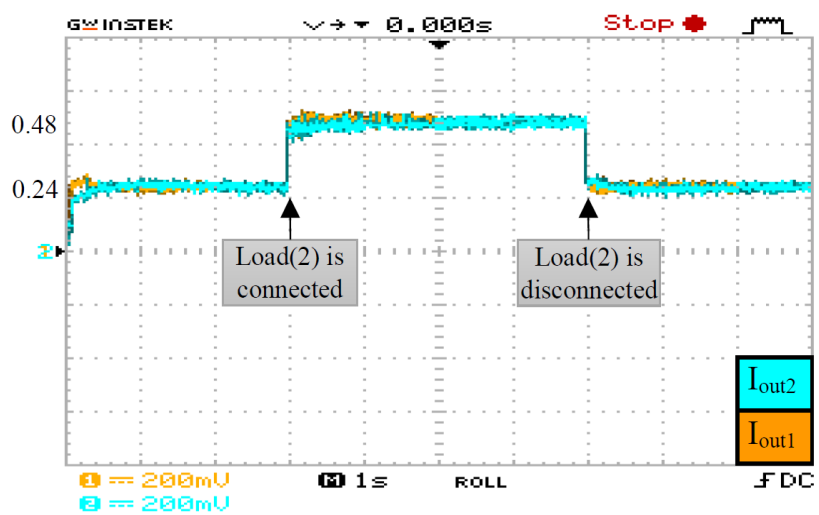
نتایج حاصل از دو آزمایش انجام شده به صورت عملی نشان دهنده کارایی مناسب روش کنترل توزیع شده پیشنهادی می باشد و نتایج حاصل از شبیه سازی را تأیید می کند. روش کنترل توزیع شده پیشنهادی می تواند ولتاژ بار را در مقدار نامی حتی تحت تغییرات بار حفظ کند. علاوه بر این، این روش تقسیم جریان صحیح بین واحدهای تولید پراکنده را در یک ریز شبکه جریان مستقیم جزیره ای تضمین می کند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵-۱۹. نتایج آزمایش دوازدهم (در محیط آزمایشگاه). الف) ولتاژهای خروجی؛ ب) ولتاژ بار؛ ج) جریان‌های

خروجی

۵-۵ جمع‌بندی:

در این فصل کارایی روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی در ریزشبکه DC تحت آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از این فصل نشان می‌دهند که روش پیشنهادی می‌تواند تقسیم جریان صحیح بین واحدهای DG و تنظیم ولتاژ باس DC را تحت تغییرات بار اهمی و بار توان ثابت تضمین کند. همچنین روش کنترل توزیع‌شده پیشنهادی عملکرد قابل قبولی در زمان قطع سیستم ارتباطی دارد. در بخش آخر این فصل نتایج حاصل از شبیه‌سازی و عملکرد مناسب روش پیشنهادی به صورت عملی در محیط آزمایشگاه مورد تأیید قرار گرفت.

فصل ۶ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری

با وجود اینکه از کنترل افی به صورت رایج در جهت تقسیم توان بین واحدهای تولید پراکنده یک ریزشکه DC استفاده می شود اما این روش با دو محدودیت روبه رو است. اولاً کنترل افی با وجود امیدانسی های خط متفاوت کارایی مناسبی ندارد، ثانیاً روش کنترل افی سبب انحراف ولتاژ در خروجی مبدل می شود. بنابراین ضروری است از یک کنترل کننده ثانویه در راستای بهبود عملکرد کنترلی ریزشکه DC استفاده شود. در این پایان نامه یک روش کنترل توزیع شده جدید در راستای بهبود تقسیم توان بین واحدهای تولید پراکنده و بازیابی انحراف ولتاژ باس DC در یک ریزشکه DC مستقل از شبکه اصلی ارائه شد. در مطالعات انجام شده در این پایان نامه تمامی موارد شامل افت ولتاژ خط ناشی از تغییرات بار، افت ولتاژ خروجی هر واحد ناشی از مقاومت مجازی، تنظیم مناسب مقاومت مجازی و... که در مقالات اخیر از آنها چشم پوشی شده بود، در نظر گرفته شده است.

همچنین در این پایان نامه یک مدل سازی دقیق برای ریزشکه DC موردنظر انجام شد و پایداری سیگنال کوچک سیستم تحت تغییرات پارامترهایی همچون تاخیر، بار اهمی و ضریب افی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با وجود اینکه مقادیر ویژه سیستم موردنظر با افزایش تاخیر در انتقال اطلاعات و کاهش مقدار مقاومت اهمی بار (افزایش جریان خروجی) به سمت راست صفحه حرکت کردند، اما این تغییرات منجر به ناپایداری سیستم نشده و پایداری سیستم به خوبی حفظ می شود. یکی دیگر از پارامترهایی که در این بخش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت ضریب افی می باشد که با توجه به نتایج ارائه شده می توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار ضریب افی حاشیه پایداری سیستم کاهش پیدا می کند و می تواند منجر به ناپایداری سیستم شود. در روند طراحی سیستم کنترلی برای ریزشکه DC در این پایان نامه، رابطه ای برای محاسبه ضریب افی متناسب با توان نامی هر واحد DG ارائه شده است که مقدار بدست آمده از این رابطه حاشیه پایداری سیستم را کاهش نخواهد داد.

در فصل پنجم، برای اثبات کارایی روش پیشنهادی یک ریزشبکه DC شامل چهار واحد تولید پراکنده در محیط شبیه‌سازی MATLAB/Simulink مورد بررسی قرار گرفت. برای تأیید نتایج حاصل از شبیه‌سازی، یک ریزشبکه DC شامل دو واحد تولید پراکنده در محیط آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که مشاهده شد، روش کنترلی پیشنهادی در حذف خطای تقسیم بار بین واحدهای DG و انحراف ولتاژ باس DC حتی در شرایط تغییرات بار (اهمی و توان ثابت) و قطع سیستم ارتباطی توانمند می‌باشد.

۶-۲ پیشنهادات

- با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیقات این پایان‌نامه، پیشنهادهای زیر جهت ادامه کار ارائه می‌شود:
۱. در بررسی کارایی روش کنترلی پیشنهادی اثر قطع یک واحد تولید پراکنده بر عملکرد ریزشبکه DC در نظر گرفته نشده است، می‌تواند در آینده قطع و وصل ناگهانی یک واحد DG نیز در طراحی و تجزیه و تحلیل کارایی روش کنترلی در نظر گرفته شود تا ریزشبکه DC یک عملکرد پایدارتر و با قابل اطمینان بیشتر داشته باشد.
 ۲. در مدل‌سازی ریزشبکه DC طراحی‌شده و بررسی پایداری سیگنال کوچک، اثر بار توان ثابت در نظر گرفته نشده است. نیاز است در آینده اثر بار توان ثابت نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شود تا از پایداری ریزشبکه DC تحت انواع بار اطمینان حاصل شود.

پوست

مشخصات فنی پردازشگر سیگنال دیجیتال (Digital Signal Processor):



TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332

Digital Signal Controllers (DSCs)

SPRS439–JUNE 2007

1 TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332 DSCs

1.1 Features

- High-Performance Static CMOS Technology
 - Up to 150 MHz (6.67-ns Cycle Time)
 - 1.9-V Core, 3.3-V I/O Design
- High-Performance 32-Bit CPU (TMS320C28x)
 - IEEE-754 Single-Precision Floating-Point Unit (FPU)
 - 16 x 16 and 32 x 32 MAC Operations
 - 16 x 16 Dual MAC
 - Harvard Bus Architecture
 - Fast Interrupt Response and Processing
 - Unified Memory Programming Model
 - Code-Efficient (in C/C++ and Assembly)
- Six Channel DMA Controller (for ADC, McBSP, XINTF, and SARAM)
- 16-bit or 32-bit External Memory Interface (XINTF)
- On-Chip Memory
 - F28335: 256K x 16 Flash, 34K x 16 SARAM
 - F28334: 128K x 16 Flash, 34K x 16 SARAM
 - F28332: 64K x 16 Flash, 26K x 16 SARAM
 - 1K x 16 OTP ROM
- Boot ROM (8K x 16)
 - With Software Boot Modes (via SCI, SPI, CAN, I2C, McBSP, XINTF, and Parallel I/O)
 - Standard Math Tables
- Clock and System Control
 - Dynamic PLL Ratio Changes Supported
 - On-Chip Oscillator
 - Watchdog Timer Module
- Any GPIO Pin Can Be Connected to One of the Eight External Core Interrupts
- Peripheral Interrupt Expansion (PIE) Block That Supports All 58 Peripheral Interrupts
- 128-Bit Security Key/Lock
 - Protects Flash/OTP/RAM Blocks
 - Prevents Firmware Reverse Engineering
- Three 32-Bit CPU Timers
- Enhanced Control Peripherals
 - Up to 18 PWM Outputs
 - Up to 6 HRPWM Outputs With 150 ps MEP Resolution
 - Up to 6 Event Capture Inputs
 - Up to 2 Quadrature Encoder Interfaces
 - Up to 6 32-bit/Six 16-bit Timers
- Serial Port Peripherals
 - Up to 2 CAN Modules
 - Up to 3 SCI (UART) Modules
 - Up to 2 McBSP/SPI Modules
 - Dedicated SPI Module
 - One Inter-Integrated-Circuit (I2C) Bus
- 12-Bit ADC, 16 Channels
 - 80-ns Conversion Rate
 - 2 x 8 Channel Input Multiplexer
 - Two Sample-and-Hold
 - Single/Simultaneous Conversions
 - Internal or External Reference
- Up to 88 Individually Programmable, Multiplexed GPIO Pins With Input Filtering
- JTAG Boundary Scan Support⁽¹⁾
- Advanced Emulation Features
 - Analysis and Breakpoint Functions
 - Real-Time Debug via Hardware
- Development Support Includes
 - ANSI C/C++ Compiler/Assembler/Linker
 - Code Composer Studio™ IDE
 - DSP/BIOS™
 - Digital Motor Control and Digital Power Software Libraries
- Low-Power Modes and Power Savings
 - IDLE, STANDBY, HALT Modes Supported
 - Disable Individual Peripheral Clocks
- Package Options
 - Lead-free Green Packaging
 - Thin Quad Flatpack (PGF)
 - MicroStar BGA™ (ZHH)
- Temperature Options:
 - A: -40°C to 85°C
 - S: -40°C to 125°C

(1) IEEE Standard 1149.1-1990 Standard Test Access Port and Boundary Scan Architecture



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this document.

Code Composer Studio, DSP/BIOS, MicroStar BGA, TMS320C28x, C28x, TMS320C2000, TMS320C54x, TMS320C55x are trademarks of Texas Instruments.

PRODUCT PREVIEW Information concerns products in the formative or design phase of development. Characteristic data and other specifications are design goals. Texas Instruments reserves the right to change or discontinue these products without notice.

Copyright © 2007, Texas Instruments Incorporated

PRODUCT PREVIEW



- [1] Hatziargyriou, N., *Microgrids: architectures and control*. 2014: John Wiley & Sons.
- [2] Dragicevic, T., P. Wheeler, and F. Blaabjerg, *DC distribution systems and microgrids*. 2018: Institution of Engineering and Technology.
- [3] De Souza, A.C.Z. and M. Castilla, *Microgrids Design and Implementation*. 2019
- [4] Karlsson, P. and J.J.I.t.o.P.E. Svensson, *DC bus voltage control for a distributed power system*. 2003. **18**(6): p. 1405-1412.
- [5] Guerrero, J.M., et al., *Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization*. 2010. **58**(1): p. 158-172.
- [6] Vandoorn, T.L., et al., *A control strategy for islanded microgrids with dc-link voltage control*. 2011. **26**(2): p. 703-713.
- [7] Dragičević, T., et al., *DC microgrids—Part I: A review of control strategies and stabilization techniques*. 2015. **31**(7): p. 4876-4891.
- [8] Sahoo, S.K., et al., *Control techniques in AC, DC, and hybrid AC–DC microgrid: A review*. 2017. **6**(2): p. 738-759.
- [9] Sen, S. and V.J.A.R.i.C. Kumar, *Microgrid control: A comprehensive survey*. 2018. **45**: p. 118-151.
- [10] Bevrani, H., B. François, and T. Ise, *Microgrid dynamics and control*. 2017: John Wiley & Sons.
- [11] Hart, D.W., *Power electronics*. 2011: Tata McGraw-Hill Education.
- [12] Zhao, F., et al. *Small-signal modeling and stability analysis of DC microgrid with multiple type of loads*. in *2014 International Conference on Power System Technology*. 2014. IEEE.
- [13] Singh, S., et al., *Constant power loads and their effects in DC distributed power systems: A review*. 2017. **72**: p. 407-421.
- [14] Dahiya, R.J.C. and E. Engineering, *Stability analysis of islanded DC microgrid for the proposed distributed control strategy with constant power loads*. 2018. **70**: p. 151-162.
- [15] Krishnamurthy, V., A.J.I.J.o.E. Kwasinski, and S.T.i.P. Electronics, *Effects of power electronics, energy storage, power distribution architecture, and lifeline dependencies on microgrid resiliency during extreme events*. 2016. **4**(4): p. 1310-1323.
- [16] Herrera, L., W. Zhang, and J.J.I.T.o.S.G. Wang, *Stability analysis and controller design of DC microgrids with constant power loads*. 2015. **8**(2): p. 881-888.
- [17] Gupta, A., S. Doolla, and K.J.I.T.o.S.G. Chatterjee, *Hybrid AC–DC microgrid: systematic evaluation of control strategies*. 2018. **9**(4): p. 3830-384. ۳
- [18] Eghtedarpour, N. and E.J.I.t.o.s.g. Farjah, *Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid*. 2014. **5**(3): p. 1494-1505.

- [19] Anand, S., B.G. Fernandes, and J.J.I.T.o.P.E. Guerrero, *Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids*. 2012. **28**(4): p. 1900-1913.
- [20] Davari, M. and Y.A.-R.I.J.I.T.o.P.E. Mohamed, *Robust droop and DC-bus voltage control for effective stabilization and power sharing in VSC multiterminal DC grids*. 2017. **33**(5) :p. 4373-4395.
- [21] Kumar, J., A. Agarwal, and V.J.J.o.E.S. Agarwal, *A review on overall control of DC microgrids*. 2019. **21**: p. 113-138.
- [22] Jiang, J.J.I.T.o.E.c., *Design of an optimal robust governor for hydraulic turbine generating units*. 1995. **10**(1) :p. 188-194.
- [23] Sun, K., et al., *A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage*. 2011. **26**(10): p. 3032-3045.
- [24] Zhang, L., et al. *Power control of DC microgrid using DC bus signaling*. in *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2011. IEEE.
- [25] Dragičević, T., J.M. Guerrero, and J.C.J.I.T.o.I.E. Vasquez, *A distributed control strategy for coordination of an autonomous LVDC microgrid based on power-line signaling*. 2013. **61**(7): p. 3313-3326.
- [26] A. Khorsandi, M. Ashourloo, H. Mokhtari, R. Iravani, *Automatic droop control for a low voltage DC microgrid*, *IET Generation, Trans-mission Distribution*, vol. 10, no. 1, pp. 41-47, Jan. 2016.
- [27] Lu, X., et al., *An improved droop control method for dc microgrids based on low bandwidth communication with dc bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy*. 2013. **29**(4): p. 1800-1812.
- [28] Meng, L., et al., *Tertiary and secondary control levels for efficiency optimization and system damping in droop controlled DC–DC converters*. 2015. **6**(6): p. 2615-2626.
- [29] Meng, L., et al. *Dynamic consensus algorithm based distributed global efficiency optimization of a droop controlled DC microgrid*. in *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 2014. IEEE.
- [30] Moayedi, S. and A.J.I.T.o.P.E. Davoudi, *Distributed tertiary control of DC microgrid clusters*. 2015. **31**(2): p. 1717-1733.
- [31] Shafiee, Q., et al., *Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters*. 2014. **29**(4): p. 922-933.
- [32] Loh, P.C., et al. *Distributed secondary control in DC microgrids with low-bandwidth communication link*. in *2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC)*. 2016. IEEE.
- [33] Huang, P.-H., et al., *A novel droop-based average voltage sharing control strategy for DC microgrids*. 2014. **6**(3): p. 1096-1106.
- [34] Nasirian, V., A. Davoudi, and F.L. Lewis. *Distributed adaptive droop control for dc microgrids*. in *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014*. 2014. IEEE.
- [35] Dam ,D.-H. and H.-H. Lee. *An adaptive power distributed control method to ensure proportional load power sharing in dc microgrid considering equivalent*

- line impedances. in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2016. IEEE.
- [36] Ghalebani ,P., M. Niasati, and society, *A distributed control strategy based on droop control and low-bandwidth communication in DC microgrids with increased accuracy of load sharing*. 2018. **40**: p. 155-164.
 - [37] Dam, D.-H. and H.-H.J.I.T.o.I.A. Lee, *A power distributed control method for proportional load power sharing and bus voltage restoration in a dc microgrid*. 2018. **54**(4): p. 3616-3625.
 - [38] F. Guo, Q. Xu, C. Wen, L. Wang, and P. Wang., *Distributed secondary control for power allocation and voltage restoration in islanded DC microgrids*, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1857-1869, Oct. 2018.
 - [39] L. Xing, Y. Mishra, F. Guo, P. Lin, Y. Yang, G. Ledwich, and Y.-C. J. I. T. o. S. G. Tian, *Distributed secondary control for current sharing and voltage restoration in DC microgrid*, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 2487-2497, May. 2020.
 - [40] Bacha, S., et al., *Power electronic converters modeling and control*. 2014. **454**: p. 454.

[۴۱] علی خاکی صدیق، سیستم‌های کنترل خطی، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۳۷۹.

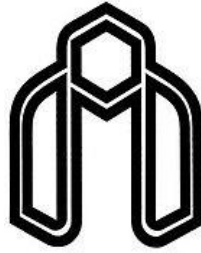
Abstract

One of the most important purposes of controlling DC microgrid is accurate load sharing among Distributed Generation (DG) units in islanded mode. Conventionally the droop control method is utilized to achieve current sharing among the DGs as a decentralized approach. The droop control faces with two limitations. Firstly, this method causes the converter output voltage deviation. Secondly, the line impedance effect is not considered in the droop control. Therefore, it is necessary to use a secondary controller to improve the performance of the DC microgrid control.

The main aim of this thesis is to present a new distributed control method at the secondary control level in order to deal with the limitations of droop control. In this way, a DC microgrid is considered in which the distributed generation resources feed the load using a boost converter connected to the DC bus in the islanded mode. The droop control method is used as the primary control, according to the limitations of this decentralized approach, a secondary controller based on the distributed control method is presented to improve the control performance of the DC microgrid. The results from the small signal stability analysis have illustrated that the DC microgrid is stable under load changes, droop coefficient variations, and various communication delays. The results of the DC microgrid simulation have shown that the proposed method has the ability to guarantee the current sharing accuracy and bus voltage regulation under both resistive loads and CPLs changes.

The experimental results have proven the effectiveness of the proposed distributed control method. These results have shown that the proposed method can overcome the droop control limitations. Also, the laboratory test results have demonstrated that the proposed method has a proper performance under load changes and it can guarantee accurate current sharing among the DG units and bus voltage regulation in a DC microgrid.

Index Terms—DC microgrid, droop control, distributed control, small signal stability



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotics
M.S.c Thesis in Electrical Power Systems Engineering

The application of distributed control method for power sharing improvement in a DC microgrid

By: Mohammadreza Mirjafari

Supervisors:
Dr. Mahdi Banejad

Advisor:
Dr. Hamed Molla-ahmadian

October 2020