

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
گروه قدرت

استفاده از مشخصه‌ی اف‌تی برای تقسیم بار در ریز شبکه‌های DC

دانشجو: امیر محمد شهری

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور:

دکتر علی اکبر زاده کلات

دکتر علی دستفان

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ماه ۱۳۹۷



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره ۱۵۷۷.ت
تاریخ: ۲۵، ۴، ۹۷

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امیر محمد شهری با شماره دانشجویی ۹۴۳۶۴۵۴ رشته مهندسی برق- قدرت گرایش سیستم تحت عنوان: استفاده از مشخصه افتنی برای تقسیم بار در ریزشبکه های DC که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۴/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: <u>معالج</u>)	<input checked="" type="checkbox"/>	مردود	<input type="checkbox"/>
نوع تحقیق:	<input checked="" type="checkbox"/> نظری	<input type="checkbox"/> عملی	

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد باقر باقر	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر علی انبیا زاده	دانشیار	
۳- استاد مشاور	دکتر سید داوود	استاد	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد سین محمدی	استاد	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محسن شادمان	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر محسن شادمان	استاد	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: عضو هیات داوران
 تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۲۵/۴/۹۷

تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

پدر مهربانم که در تمامی مراحل زندگی، پشتیبان همیشگی‌ام هستند و همچنین مادر عزیزتر از جانم که دعایش همیشه راه گشای زندگی‌م بوده و هست.

تشکر و قدردانی

وظیفه خود می‌دانم سپاسگزار تمام آنهایی باشم که در این دوره‌ی ارزشمند بودنشان و امیدشان راهگشای من بود؛ پدر و مادر عزیزم که همانند تمام روزهای گذشته با صبر و حوصله در کنارم بودند. همچنین از استاد عزیز و گرانقدرم جناب آقای دکتر مهدی بانژاد که با تلاش‌های بی‌شائبه‌ی خود مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند و به هنگام نیاز برای حل مشکلات اینجانب از هیچ کمکی دریغ نکردند. برای ایشان آرزوی سلامتی، موفقیت و سربلندی را دارم. همچنین کمال قدردانی را از جناب آقای دکتر علی اکبر زاده کلات و جناب آقای دکتر علی دستفان به عمل می‌آورم که در انجام این پروژه از راهنمایی هایشان به عنوان استاد مشاور بهره برده‌ام. از کلیه دوستان عزیزم مخصوصاً جناب آقای مهندس جواد برسلانی که در انجام این پایان‌نامه از راهنمایی‌های ایشان استفاده کردم تشکر می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب**امیرمحمد شهری**..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته**برق / قدرت**..... دانشکده**برق و رباتیک**..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه استفاده از مشخصه‌ی افتی برای تقسیم بار در ریزشبکه‌های **DC**.... تحت راهنمایی...**دکتر مهدی بانزاد**...متعهد می شوم .

- ♦ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- ♦ در استفاده از نتایج پژوهش 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 رایانه ای، نرم افزارها 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

اخیرا استفاده از ریزشبکه‌ها و منابع انرژی تجدیدپذیر، خصوصا ریزشبکه‌های DC افزایش یافته است که در این راستا، تقسیم صحیح توان بین منابع انرژی تجدیدپذیر از اهمیت خاصی برخوردار است.

در این پایان‌نامه تقسیم توان مبتنی بر مشخصه‌ی افتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این تحقیق، در ابتدا به معرفی مشخصه‌ی افتی به عنوان یک روش تقسیم توان غیرمتمرکز پرداخته می‌شود. به منظور بهبود تقسیم توان مبتنی بر مشخصه‌ی افتی، دو روش کنترلی تحت عنوان روش کنترل افتی تطبیقی و روش کنترل افتی بهبود یافته مبتنی بر منطق فازی پیشنهاد می‌شوند. در این پایان‌نامه، این دو روش پیشنهادی برای تقسیم توان بین دو مبدل DC-DC مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور، روش‌های پیشنهاد شده بر روی یک سیستم تست در نرم افزار سیمولینک شبیه سازی می‌شوند. پس از آن برای نشان دادن عملکرد واقعی روش‌های پیشنهادی، این روش‌ها بر روی یک سیستم نمونه‌ی آزمایشگاهی پیاده سازی می‌شوند. نتایج حاصل از شبیه سازی روش‌های پیشنهادی مبتنی بر مشخصه‌ی افتی با نتایج روش کنترل افتی متداول مورد مقایسه قرار می‌گیرند. مقایسه‌ها نشان می‌دهند که روش‌های پیشنهادی عملکرد بهتری در مقایسه با روش کنترل افتی متداول دارند. همچنین روش‌های پیشنهادی مبتنی بر منطق فازی نیز با روش کنترل افتی تطبیقی مقایسه می‌شود و نتایج نشان می‌دهند که روش مبتنی بر منطق فازی عملکرد بهتر و پیاده سازی آسان‌تری در ریزشبکه‌های DC دارد.

به طور مشابه، این مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه سازی روش‌های پیشنهادی نیز صورت می‌گیرد. نتایج آزمایشگاهی و همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی، صحت و توانایی روش‌های پیشنهادی را در تقسیم توان در ریزشبکه‌های DC تایید می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: تنظیم ولتاژ، جریان گردشی، ریزشبکه‌ی DC، شاخص افتی بهبود یافته، شاخص افتی تطبیقی، صحت تقسیم جریان، ضریب افتی، کنترل افتی فازی.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- بیان مسئله	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱- اهداف تحقیق	۳
۴-۱- نوآوری‌های پایان نامه	۴
۵-۱- مروری بر فصل‌های پایان نامه	۴
فصل ۲: ریزشک‌های DC و تقسیم توان	۵
۱-۲- مقدمه	۶
۲-۲- ریزشک‌ها	۶
۱-۲-۲- ریزشک‌های DC	۷
۳-۲- مبدل DC-DC افزاینده	۹
۴-۲- تقسیم بار در ریزشک‌های DC	۱۰
۱-۴-۲- روش‌های تقسیم بار متمرکز یا فعال	۱۱
۲-۴-۲- روش‌های تقسیم بار غیرمتمرکز یا غیرفعال	۱۵
۵-۲- سیستم مورد مطالعه	۱۷
۶-۲- مدل بار در ریزشک‌های DC	۱۹
۷-۲- سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی	۲۰
۸-۲- بررسی عملکرد روش کنترل افتی متداول	۲۱
۹-۲- ارائه‌ی راهکارهایی برای بهبود روش کنترل افتی	۲۲
۱-۹-۲- روش‌های تعیین مقدار ضریب افتی مناسب	۲۲
۲-۹-۲- ارائه‌ی مشخصه‌های افتی بهبود یافته	۲۶
۳-۹-۲- روش‌های حذف اثر مقاومت خطوط	۲۹
۴-۹-۲- روش‌های کنترلی نیمه متمرکز	۳۰
۱۰-۲- به کارگیری مکانیزم افتی در روش‌های کنترل سلسله مراتبی	۳۵
۱۱-۲- بررسی پایداری سیستم‌های تحت کنترل افتی و ارائه‌ی راهکارهایی برای بهبود آن	۳۷
۱۲-۲- جمع بندی	۳۸
فصل ۳: روش کنترل افتی تطبیقی برای تقسیم بار در ریزشک‌های DC	۳۹
۱-۳- مقدمه	۴۰

۴۱	.....تنظیم ولتاژ.....۲-۱-۳
۴۲	.....صحت تقسیم جریان.....۳-۱-۳
۴۳	.....پایداری بارهای توان ثابت.....۴-۱-۳
۴۳	.....تلفات سیستم.....۵-۱-۳
۴۵	.....روش کنترل افقی تطبیقی.....۲-۳
۵۱	.....معرفی سیستم مورد آزمایش.....۳-۳
۵۱	.....مشخصات سیستم تست.....۴-۳
۵۲	.....شبیه سازی.....۵-۳
۶۵	.....معرفی ساز و کار کنترلی مبدل افزاینده.....۲-۵-۳
۵۴	.....شبیه سازی روش کنترلی پیشنهادی.....۳-۵-۳
۵۵	.....ساخت سخت افزار و پیاده سازی روش پیشنهادی بر روی یک نمونه ی آزمایشگاهی.....۶-۳
۵۸	.....نتایج شبیه سازی و ساخت نمونه ی آزمایشگاهی.....۷-۳
۵۸	.....نتایج شبیه سازی و ساخت روش کنترل افقی متداول.....۱-۷-۳
۶۵	.....نتایج حاصل از شبیه سازی روش کنترل افقی تطبیقی.....۲-۷-۳
۶۷	.....بررسی نتایج حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افقی تطبیقی.....۳-۷-۳
	.....مقایسه ی نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی روش کنترل افقی تطبیقی با نتایج روش کنترل افقی متداول.....۴-۷-۳
۶۸	.....کنترل افقی متداول.....۵-۷-۳
	.....شبیه سازی روش های مختلف برای اعمال تغییرات کوچک بار به صورت مرحله به مرحله.....۶-۷-۳
۷۰	.....مرحله.....۷-۳
۷۲	.....جمع بندی.....۸-۳

فصل ۴: روش کنترل افقی فازی برای تقسیم توان در ریزشبه های DC.....۷۳

۷۴	.....مقدمه.....۱-۴
۷۵	.....روش کنترل افقی فازی بهبود یافته.....۲-۴
۷۵	.....مکانیزم فازی.....۱-۲-۴
۷۸	.....تعیین ضریب افقی با استفاده از شاخص افقی بهبود یافته.....۲-۲-۴
۸۰	.....تحلیل پایداری سیگنال کوچک.....۳-۴
۸۳	.....مکان هندسی ریشه ها.....۲-۳-۴
۸۵	.....شبیه سازی و پیاده سازی آزمایشگاهی روش کنترل افقی فازی بهبود یافته.....۴-۴
۸۶	.....بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی.....۲-۴-۴
۸۸	.....بررسی نتایج حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افقی فازی بهبود یافته.....۳-۴-۴

- ۴-۴-۴- مقایسه‌ی نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی روش کنترل اف‌تی تطبیقی با نتایج روش
کنترل اف‌تی متداول..... ۸۹
- ۴-۴-۵- شبیه سازی روش کنترل اف‌تی فازی بهبود یافته برای اعمال تغییرات کوچک بار به
صورت مرحله به مرحله ۹۳
- ۴-۱- جمع بندی..... ۹۴

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۹۵

- ۵-۱- نتیجه گیری..... ۹۶
- ۵-۲- پیشنهادات..... ۹۷

مراجع..... ۹۸

پیوست‌ها..... ۱۰۴

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) ساختار کلی یک ریزشبه ی DC ۸
- شکل (۲-۲) شماتیک کلی یک مبدل DC-DC افزایشده ۹
- شکل (۳-۲) شماتیک کلی روش کنترل متمرکز ۱۲
- شکل (۴-۲) شماتیک کلی روش کنترلی ارباب-برده ۱۳
- شکل (۵-۲) شماتیک کلی روش تقسیم بار متوسط ۱۴
- شکل (۶-۲) شماتیک کلی روش تقسیم بار متوسط ۱۴
- شکل (۷-۲) مشخصه ی افتری ولتاژ- جریان مورد استفاده در ریزشبه ی DC ۱۵
- شکل (۸-۲) شماتیک کلی یک مبدل تحت کنترل افتری ۱۶
- شکل (۹-۲) الف) مبدل های DC-DC موازی ب) مدار معادل حالت ماندگار برای سمت خروجی DC ۱۷
- شکل (۱۰-۲) الف) اختلاف تقسیم جریان و تلفات خروجی با تغییر R_d ب) شاخص افتری و R_d ۲۳
- شکل (۱۱-۲) الف) اختلاف تقسیم جریان نرمالیزه شده و تنظیم ولتاژ خروجی با تغییر در R_d ب) شاخص افتری تناسبی و R_d ج) کنترل ولتاژ خروجی با جابجایی R_d برای تقسیم بار یکسان ۲۴
- شکل (۱۲-۲) مشخصه ی روش کنترل افتری اتوماتیک ۲۷
- شکل (۱۳-۲) الف) مشخصه ی افتری و ب) ضریب افتری، برای روش های کنترل افتری خطی، غیرخطی و روش بیشترین ضریب افتری ۲۸
- شکل (۱۴-۲) مشخصه ی افتری برای مقاومت های خط متفاوت ۲۹
- شکل (۱-۳) الف) ریزشبه ی DC با دو مبدل افزایشده تحت کنترل افتری ب) مدار معادل حالت ماندگار سیستم ۴۰
- شکل (۲-۳) تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ برای دو مبدل موازی با مشخصه های افتری الف) با ولتاژهای مرجع نابرابر و ضرایب افتری یکسان ب) با ولتاژهای مرجع نابرابر و ضرایب افتری نابرابر ۴۱
- شکل (۳-۳) اثر افزایش ضریب افتری بر روی تنظیم ولتاژ و تقسیم جریان ۴۲
- شکل (۴-۳) کل تلفات سیستم برای دو ضریب افتری مختلف به ازای تغییرات جریان ۴۳

- شکل (۵-۳) الف) اثر افزایش ضریب افتی بر روی اختلاف جریان و تلفات مبدل‌ها ب) شاخص مرحله‌ی اول ج) اثر افزایش جریان بر روی شاخص مرحله‌ی اول د) اثر افزایش جریان بر روی شاخص افتی تطبیقی..... ۴۷
- شکل (۶-۳) الفلوچارت روش آشوب و مشاهده مورد استفاده برای محاسبه‌ی مقدار کمینه‌ی شاخص افتی تطبیقی..... ۴۹
- شکل (۷-۳) الف) عناصر مبدل‌های DC-DC افزایشنده در سیستم مورد مطالعه ب) معادل مداری مبدل‌ها..... ۵۰
- شکل (۸-۳) شماتیک کلی سیستم تست شبیه‌سازی شده تحت کنترل افتی تطبیقی پیشنهادی..... ۵۲
- شکل (۹-۳) مبدل افزایشنده‌ی کنترل شده با جریان متوسط..... ۵۴
- شکل (۱۰-۳) نحوه‌ی پیاده‌سازی روش کنترل افتی تطبیقی در محیط سیمولینک متلب..... ۵۵
- شکل (۱۱-۳) شماتیک کلی سیستم نمونه‌ی آزمایشگاهی..... ۵۵
- شکل (۱۲-۳) شمای کلی فرایند تولید دو سیگنال PWM برای کنترل دو مبدل DC-DC در پردازشگر DSP..... ۵۶
- شکل (۱۳-۳) فلوچارت برنامه‌ی پیاده‌سازی شده در پردازشگر DSP..... ۵۶
- شکل (۱۴-۳) سیستم نمونه‌ی آزمایشگاهی شامل تغذیه، بار، برد آزمایشگاهی، پروگرامر و اسیلوسکوپ..... ۵۷
- شکل (۱۵-۳) برد آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده شامل دو قسمت مدار فرمان و مدار قدرت..... ۵۷
- شکل (۱۶-۳) الف) برد آزمایشگاهی ب) مجموعه‌ی بار ج) مجموعه‌ی باتری د) مقاومت خطوط اتصال..... ۵۸
- شکل (۱۷-۳) الف) جریان خروجی مبدل‌ها ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه‌سازی روش کنترل افتی متداول با ضریب افتی کوچک $R_d = 0.2$ به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۵۹
- شکل (۱۸-۳) الف) جریان خروجی مبدل‌ها ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه‌سازی روش کنترل افتی متداول با ضریب افتی کوچک $R_d = 0.2$ به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۰
- شکل (۱۹-۳) الف) جریان خروجی مبدل‌ها ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده‌سازی عملی روش کنترل افتی متداول با ضریب افتی کوچک $R_d = 0.2$ به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۰

- شکل (۳-۲۰) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افی متداول با ضریب افی کوچک $R_d = 0.2$ به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۱
- شکل (۳-۲۱) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی متداول با ضریب افی بزرگ $R_d = 2$ به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۲
- شکل (۳-۲۲) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی متداول با ضریب افی بزرگ $R_d = 2$ به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۳
- شکل (۳-۲۳) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افی متداول با ضریب افی بزرگ $R_d = 2$ به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۳
- شکل (۳-۲۴) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افی متداول با ضریب افی بزرگ $R_d = 2$ به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۴
- شکل (۳-۲۵) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۵
- شکل (۳-۲۶) ضریب افی معادل حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی به ازای الف) کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ (ب) افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۵
- شکل (۳-۲۷) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۶
- شکل (۳-۲۸) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۷
- شکل (۳-۲۹) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۶۸
- شکل (۳-۳۰) اختلاف جریان دو مبدل به ازای شبیه سازی روش های کنترل افی متداول با ضرایب افی کوچک و بزرگ و روش کنترل افی تطبیقی ۶۸

شکل (۳-۳۱) انحراف ولتاژ باس DC به ازای شبیه سازی روش های کنترل افی متداول با ضرایب افی کوچک و بزرگ و روش کنترل افی تطبیقی ۶۹

شکل (۳-۳۲) اختلاف جریان دو مبدل به ازای شبیه سازی روش های کنترل افی متداول با ضرایب افی کوچک و بزرگ و روش کنترل افی تطبیقی ۶۹

شکل (۳-۳۳) انحراف ولتاژ باس DC به ازای شبیه سازی روش های کنترل افی متداول با ضرایب افی کوچک و بزرگ و روش کنترل افی تطبیقی ۶۹

شکل (۳-۳۴) الف) جریان خروجی مبدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی متداول با ضریب افی کوچک $R_d = 0.2$ به ازای تغییرات کوچک مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۷۱

شکل (۳-۳۵) الف) جریان خروجی مبدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی متداول با ضریب افی بزرگ $R_d = 2$ به ازای تغییرات کوچک مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۷۱

شکل (۳-۳۶) الف) جریان خروجی مبدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی به ازای تغییرات کوچک مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۷۲

شکل (۴-۱) تابع عضویت با توزیع گوسی استفاده شده در روش کنترل افی فازی ۷۶

شکل (۴-۲) تابع عضویت نقطه‌ای برای روش پیشنهادی ۷۷

شکل (۴-۳) شماتیک کلی روش کنترل افی فازی بهبود یافته‌ی پیشنهادی ۷۷

شکل (۴-۴) اثر افزایش جریان بر روی مقدار کمینه‌ی شاخص افی تطبیقی ۷۸

شکل (۴-۵) فلوچارت روش محاسبه‌ی مقدار کمینه‌ی شاخص افی بهبود یافته‌ی پیشنهادی ۷۹

شکل (۴-۶) مدل ساده شده‌ی ریزشکه‌ی DC با دو واحد تولید پراکنده ۸۰

شکل (۴-۷) اثر افزایش مقاومت بار بر روی مقادیر ویژه‌ی سیستم در روش کنترل افی فازی پیشنهادی ۸۳

شکل (۴-۸) اثر افزایش مقاومت خط اتصال بر روی مقادیر ویژه‌ی سیستم در روش کنترل افی فازی پیشنهادی ۸۳

شکل (۴-۹) اثر افزایش ضرایب افی بر روی مقادیر ویژه‌ی سیستم در روش کنترل افی فازی پیشنهادی ۸۴

شکل (۴-۱۰) اثر افزایش اندوکتانس خط بر روی مقادیر ویژه‌ی سیستم در روش کنترل افی فازی پیشنهادی ۸۴

شکل (۴-۱۱) شماتیک کلی سیستم تست شبیه سازی شده تحت کنترل افی فازی پیشنهادی ۸۵

شکل (۴-۱۲) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی فازی پیشنهادی به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۸۶

شکل (۴-۱۳) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی فازی پیشنهادی به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۸۷

شکل (۴-۱۴) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افی فازی پیشنهادی به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۸۸

شکل (۴-۱۵) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افی فازی پیشنهادی به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۸۹

شکل (۴-۱۶) اختلاف جریان دو مبدل به ازای شبیه سازی روش‌های کنترل افی متداول با ضرایب افی کوچک و بزرگ و روش کنترل افی فازی ۹۰

شکل (۴-۱۷) انحراف ولتاژ باس DC به ازای شبیه سازی روش‌های کنترل افی متداول با ضرایب افی کوچک و بزرگ و روش کنترل افی فازی ۹۰

شکل (۴-۱۸) اختلاف جریان دو مبدل به ازای پیاده سازی عملی روش‌های کنترل افی متداول با ضرایب افی کوچک و بزرگ و روش کنترل افی فازی ۹۰

شکل (۴-۱۹) انحراف ولتاژ باس DC به ازای پیاده سازی عملی روش‌های کنترل افی متداول با ضرایب افی کوچک و بزرگ و روش کنترل افی فازی ۹۱

شکل (۴-۲۰) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی فازی بهبود یافته به ازای تغییرات کوچک مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ ۹۳

شکل (۵-۱): الف) مدار معادل مبدل افزایش یافته برای (ب) حالت کلید بسته ج) حالت کلید باز.. ۱۰۵

شکل (۵-۲) شکل موج‌های مبدل افزایش یافته (الف) ولتاژ سلف؛ (ب) جریان دیود؛ (ج) جریان سلف؛ (د) جریان خازن. ۱۰۶

فهرست جداول

- جدول (۱-۳) مشخصات سیستم تست. ۵۱.....
- جدول (۲-۳) مشخصات عناصر نیمه هادی مربوط به شیشه سازی در نرم افزار. ۵۳.....
- جدول (۳-۳) ضرایب کنترلی جبران سازها. ۵۴.....
- جدول (۱-۴) مقایسه ی عملکرد روش های شیشه سازی شده. ۹۲.....

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- بیان مسئله

امروزه با توجه به گسترش جوامع شهری و افزایش تقاضای انرژی از سوی مصرف کنندگان خانگی و صنعتی و همچنین کاهش منابع سوخت‌های فسیلی که عامل اصلی تغییرات آب و هوایی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند، استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر جایگاه ویژه‌ای یافته است. به همین دلیل بررسی سیستم‌های مبتنی بر منابع تجدیدپذیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است.

به دلیل پراکندگی تقاضای انرژی و همچنین لزوم تامین انرژی در نقاطی که از شبکه‌ی سراسری برق فاصله دارند، عموماً از منابع تولید پراکنده^۱ در شبکه‌هایی با مقیاس کوچکتر که به آنها ریز شبکه^۲ گویند، استفاده می‌شود [۴-۱].

مسئله‌ی اساسی در ریز شبکه‌های DC، کنترل مبدل‌ها به ویژه به منظور تقسیم بار بین آنها است. برای این منظور روش‌های مختلفی ارائه شده که به طور کلی به دو دسته‌ی روش‌های متمرکز^۳ و غیرمتمرکز^۴ تقسیم می‌شوند. روش‌های متمرکز علاوه بر نیاز به یک کنترل کننده‌ی مرکزی، به ارتباطات بین مبدل‌ها و آن کنترل کننده نیازمند هستند که باعث کاهش قابلیت اطمینان، افزایش هزینه‌ها و پیچیدگی سیستم خواهد شد. در مقابل، روش‌های غیرمتمرکز به کنترل کننده‌ی مرکزی و ارتباطات نیازی ندارند و کنترل را به صورت محلی انجام می‌دهند. به همین دلیل استفاده از روش‌های غیرمتمرکز گسترش بیشتری یافته‌اند [۳].

یکی از محبوب‌ترین و کارآمدترین روش‌های کنترل غیرمتمرکز، روش کنترل افتی^۵ است که به سبب ماهیت آن در کاهش ولتاژ متناسب با جریان، از آن به عنوان روش مقاومت مجازی^۶

^۱ Distributed Generation

^۲ Microgrid

^۳ Centralized method

^۴ Decentralised method

^۵ Droop control method

^۶ Virtual resistance

نیز یاد می‌شود. البته استفاده از روش کنترل اف‌تی متعارف نیز نواقصی اعم از تقسیم نابرابر جریان بار، تنظیم ولتاژ^۱ ضعیف و در نتیجه بروز جریان گردش^۲ بین مبدل‌ها را دارد که به دلیل وجود پارامترهای نابرابر خط، تفاوت مرجع‌های اسمی ولتاژ، استفاده از ضرایب اف‌تی^۳ ثابت بدون در نظر گرفتن انحراف ولتاژ لحظه‌ای و ... به وجود می‌آیند [۷-۱].

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

به کارگیری روش کنترل اف‌تی متداول به منظور تقسیم بار در ریزشبه‌ها نمی‌تواند تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ مطلوبی را برای سیستم فراهم کند. لذا این تحقیق در نظر دارد با ارائه روش‌هایی برای بهبود عملکرد روش کنترل اف‌تی متداول، به طور همزمان به تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ مطلوبی دست پیدا نماید.

۱-۳- اهداف تحقیق

اهداف این پایان نامه به صورت زیر می‌باشند:

۱. بررسی روش کنترل اف‌تی متداول، بیان نقاط قوت و ضعف آن و همچنین ارائه راهکارهایی برای غلبه بر محدودیت‌های آن.
۲. ارائه روشی برای تعیین مقدار ضریب اف‌تی، متناسب با شرایط بارگذاری سیستم.
۳. ارزیابی صحت تئوری‌های بیان شده و شبیه‌سازی روش‌های کنترلی پیشنهاد شده.
۴. پیاده‌سازی روش‌های کنترل اف‌تی متداول و روش‌های پیشنهادی بر روی یک سیستم نمونه آزمایشگاهی و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن با نتایج شبیه‌سازی.

^۱ Voltage regulation

^۲ Circulating current

^۳ Droop gain

۱-۴- نوآوری‌های پایان نامه

در این پایان نامه برای بهبود تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ دو روش پیشنهاد می‌شود که شامل نوآوری‌های زیر می‌باشند:

۱- روش اول یک شاخص جدید با در نظر گرفتن اثر جریان بار برای محاسبه‌ی مقدار ضریب افتی مناسب معرفی می‌کند.

۲- روش دوم یک مکانیزم فازی برای محاسبه‌ی ضریب افتی مناسب معرفی می‌کند که برای تنظیم مشخصات آن از یک شاخص بهبود یافته برای تعیین ضریب افتی استفاده می‌شود.

۱-۵- مروری بر فصل‌های پایان نامه

این پایان نامه از پنج فصل تشکیل می‌شود. در فصل دوم به معرفی مفاهیم اصلی نظیر تقسیم توان در ریزشبکه‌های DC پرداخته می‌شود و مروری بر کارهای انجام شده در این حوزه با محوریت روش‌های کنترل غیرمتمرکز صورت می‌گیرد. در فصل سوم برای غلبه بر محدودیت‌های روش کنترل افتی متداول یک روش کنترل افتی تطبیقی با استفاده از ارتباطات با پهنای باند کم LBC^۱ معرفی می‌گردد. سپس نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی عملی این روش ارائه و با نتایج حاصل از پیاده سازی روش کنترل افتی متداول مقایسه می‌گردد. در فصل چهارم، یک روش کنترل بهبود یافته مبتنی بر منطق فازی به منظور تقسیم مناسب توان بین مبدل‌ها در ریز شبکه‌های DC پیشنهاد می‌شود. سپس به منظور ارزیابی عملکرد این روش، نتایج شبیه سازی و پیاده سازی عملی آن بر روی یک نمونه‌ی آزمایشگاهی ارائه می‌گردد و با نتایج روش پیشنهادی و نتایج روش کنترل افتی متداول مقایسه می‌شوند. در فصل پایانی نیز نتیجه‌گیری شامل مروری خلاصه وار بر موضوعات بیان شده در این پایان نامه و جمع بندی کلی در خصوص عملکرد روش‌های پیشنهادی و همچنین پیشنهاداتی برای کارهای بعدی ارائه می‌گردد.

^۱ Low bandwidth communication

فصل ۲: ریز شبکه های DC و تقسیم توان

۱-۲- مقدمه

در این قسمت از پایان نامه، به بیان مفاهیم مورد نیاز برای پرداختن به موضوع استفاده از مشخصه‌ی افتی برای تقسیم بار در ریزشبکه‌های DC پرداخته می‌شود. در ادامه به مروری بر کار-های انجام شده در حوزه‌ی تقسیم توان در ریزشبکه‌های DC پرداخته می‌شود. به طور کلی می‌توان مقالات و پژوهش‌های ارائه شده در این زمینه را به صورت زیر تقسیم بندی کرد:

۱. بررسی عملکرد روش کنترل افتی متداول
۲. ارائه‌ی راهکارهایی برای بهبود روش کنترل افتی
 - الف- روش‌های تعیین مقدار ضریب افتی مناسب
 - ب- ارائه‌ی مشخصه‌های افتی بهبود یافته
 - ج- روش‌های حذف اثر مقاومت خطوط
 - د- روش‌های کنترلی نیمه متمرکز
۳. به کارگیری مکانیزم افتی در روشهای کنترل سلسله مراتبی
۴. بررسی پایداری سیستم‌های تحت کنترل افتی و ارائه راهکارهایی برای بهبود آن

۲-۲- ریزشبکه

در سال‌های اخیر به علت وجود نگرانی‌هایی درباره‌ی تغییرات اقلیمی، گرم شدن کره‌ی زمین و کاهش سوخت‌های فسیلی، تولید انرژی توسط منابع تولید پراکنده و به طور خاص منابع انرژی تجدیدپذیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. از آنجا که یکپارچه سازی فناوری-های جدید در یک شبکه‌ی هوشمند در مقیاس بالا، کار دشواری خواهد بود، مفهوم ریزشبکه به عنوان یک نهاد کنترل‌پذیر مطرح می‌شود [۸]. ریزشبکه، یک سیستم قدرت کوچک است که از اجتماع منابع تولید پراکنده‌ی مختلف، انواع بارها و دستگاه‌های ذخیره سازی انرژی که توسط رابط‌های الکترونیک قدرت^۱ به یکدیگر متصل می‌شوند، تشکیل می‌شود.

^۱ Power electronic interfaces

به طور کلی مفهوم ریزشبكة برای تامین پایدار انرژی و بهره برداری مناسب از منابع تولید پراکنده‌ی مقیاس کوچک نظیر انرژی های خورشیدی، بادی و پیل سوختی و ... به کار می‌رود [۹،۱۰]. ریزشبكة‌ها، با توجه به نوع ولتاژ باس مشترکشان به دو دسته‌ی ریزشبكة‌های AC و DC تقسیم می‌شوند [۴-۸]. ریزشبكة‌ها عموماً در شبکه‌های با ولتاژ پایین و متوسط، یا همان شبکه‌ی توزیع کار می‌کنند [۳]. از مزایای ریزشبكة‌ها می‌توان به انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان بالای آنها اشاره کرد. مزایای اصلی این ریزشبكة‌ها، امکان بهره برداری از آنها در دو حالت جزیره‌ای^۱ یا متصل به شبکه^۲، تامین برق با کیفیت بالا برای مراکز پژوهشی و درمانی، کاهش تلفات انتقال به دلیل تولید توان در محل مصرف و همچنین برق دار کردن نواحی دور دست می‌باشند [۵،۱۱-۱۳]. لازم به ذکر است که اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه های AC یا DC، از طریق رابط‌های الکترونیک قدرت، انعطاف پذیری در تبدیلات و تولید سطوح مختلف ولتاژ و جریان را در پی خواهد داشت [۵]. ریزشبكة‌ها این امکان را فراهم می‌کنند که کاربر نهایی نه تنها به توان شبکه‌ی اصلی متکی نباشد بلکه تولید، کنترل، ذخیره و بهره برداری اقتصادی از یک سیستم تولید توان نیز به صورت محلی صورت پذیرد [۱].

۲-۲-۱- ریزشبكة‌ی DC

از آنجا که سیستم‌های قدرت موجود، اغلب بر سیستم‌های AC تکیه دارند، اغلب پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه‌ی ریزشبكة‌ها، به کار بر روی ریزشبكة‌های AC متمرکز دارند. با این حال در سال‌های اخیر، به دلیل وجود مزایایی نظیر کنترل و هماهنگ سازی ساده‌تر به علت نبود فرکانس، همچنین بازده بالاتر، تطابق و سازگاری بهتر با مصرف کننده‌های الکترونیکی، ارتباط آسانتر با منابع انرژی تجدیدپذیر، پایین بودن هزینه‌ها و همچنین عدم وجود مسائلی نظیر توان راکتیو، کیفیت توان^۳، جریان هجومی ترانسفورماتور^۱، اثر پوستی^۲ در ریزشبكة‌های DC، این نوع از

^۱ Islanded

^۲ Grid connected

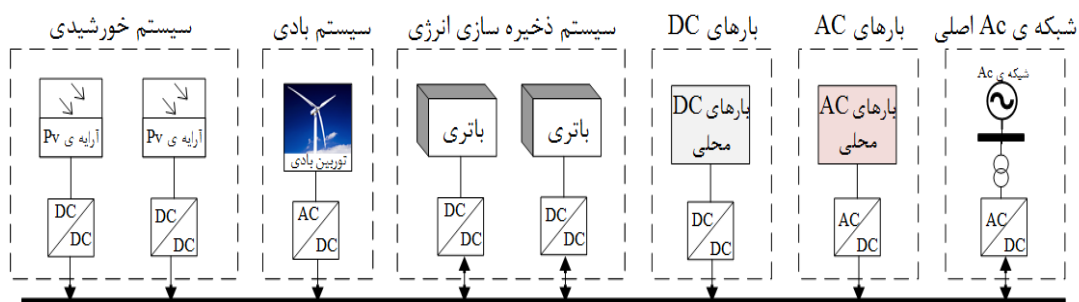
^۳ Power quality

ریزشبکه‌ها توانسته‌اند جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص دهند [۱۷-۱۴]. همچنین بسیاری از منابع تجدیدپذیر و بارهای پایدار، نظیر سیستم‌های خورشیدی، باتری‌ها و بارهای الکترونیکی، ماهیت DC دارند و اتصال آنها با رابط‌های DC به AC و AC به DC مختلف باعث بروز تلفات زیاد می‌گردد [۱۹-۱۶]. ریزشبهه‌های DC به طور گسترده در تغذیه‌ی سیستم‌های ایزوله نظیر کشتی‌ها، زیردریایی‌ها، هواپیماها، سفینه‌های فضایی، مراکز داده و سیستم‌های مخابراتی به کار گرفته می‌شوند [۱,۳,۶].

عمده مسائل مورد بحث در مورد منابع DC موازی، عبارتند از الف) پایداری سیستم که نیاز به طراحی مناسب مبدل‌ها دارد. ب) کنترل موثر ولتاژ باس DC، چون عمدتاً بارهای الکترونیکی نسبت به انحرافات ولتاژ حساس هستند. همچنین باید از ایجاد جریان گردش بین مبدل‌ها جلوگیری شود. ج) تقسیم مناسب جریان بار بین منابع تولید پراکنده که عبارت است از تقسیم جریان بار به طور مساوی یا متناسب با توان نامی منابع یا بر اساس هزینه [۲۱, ۲۰, ۳]. ذخیره سازی انرژی و ردیابی حداکثر توان منابع نیز در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند.

در این ریزشبهه‌ها عموماً منابع تولید پراکنده توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت موازی به باس مشترک DC متصل می‌شوند. بازدهی و قابلیت اطمینان بالا و تعمیر و نگهداری آسان از جمله مزایای استفاده از این مبدل‌های موازی هستند. با این حال مسئله‌ی اساسی، کنترل ولتاژ و تقسیم نامناسب جریان بار بین مبدل‌ها است.

ساختار کلی یک ریزشبهه‌ی DC در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



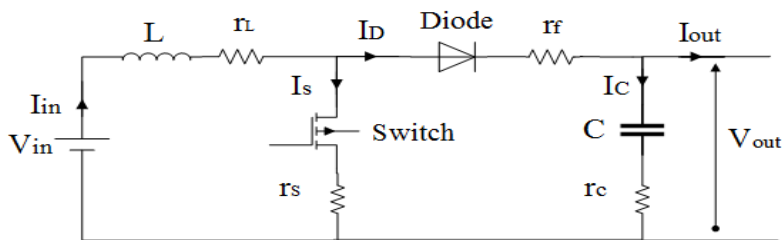
شکل (۲-۱) ساختار کلی یک ریزشبهه‌ی DC.

^۲ Transformer inrush current

^۲ Skin effect

۳-۲- مبدل DC-DC افزایشنده^۱

برای کنترل ولتاژ باس DC و جریان منبع و به طور کل تقسیم توان بین منابع باید مبدل-های الکترونیک قدرت را کنترل کرد. برای این کار به بررسی مشخصات مبدل DC-DC افزایشنده پرداخته می‌شود. روابط این قسمت مطابق با روابط ذکر شده در مرجع [22] می‌باشند.



شکل (۲-۲) شماتیک کلی یک مبدل DC-DC افزایشنده [۲۲].

شماتیک کلی یک مبدل افزایشنده در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. مبدل افزایشنده، یک مبدل بر پایه‌ی کلیدزنی است که با باز و بسته کردن کلید الکترونیک قدرت کار می‌کند. این مبدل به دلیل بزرگتر بودن ولتاژ خروجی نسبت به ولتاژ ورودی‌اش، مبدل افزایشنده نامیده می‌شود. با توجه به روابط بیان شده در پیوست ۱، نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی مبدل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (1-2)$$

که سیکل وظیفه^۲ D برابر است با نسبت زمان روشن بودن سوئیچ به دوره‌ی تناوب کلیدزنی. با توجه به روابط بیان شده در پیوست ۱، حداقل ظرفیت سلف و خازن مورد نیاز برای عملکرد مبدل در حالت جریان پیوسته^۳ به صورت زیر می‌باشند:

^۱ DC-DC boost converter

^۲ Duty cycle

^۳ Continuous current mode

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

$$C_{\min} = \frac{D}{R(\Delta V_o / V_o) f} \quad (3-2)$$

که L_{\min} و C_{\min} به ترتیب حداقل ظرفیت سلف و خازن برای عملکرد در حالت جریان پیوسته، R بار خروجی مبدل، D سیکل وظیفه، f فرکانس کلیدزنی، V_o ولتاژ خروجی مبدل و ΔV_o ریبیل ولتاژ خروجی هستند.

۴-۲- تقسیم بار در ریزش شبکه های DC

به طور کلی تقسیم بار بین منابع تولید پراکنده که عمدتاً برای دستیابی به کارایی و قابلیت اطمینان بیشتر به صورت موازی با یکدیگر کار می کنند، از طریق کنترل مبدل های الکترونیک قدرت صورت می گیرد. لازم به ذکر است که دستیابی به مزایای استفاده از ریزش شبکه ها نظیر قابلیت اطمینان بالا، به سودمندی و کارایی طرح های کنترلی همین بخش بستگی دارد [۴،۵،۲۰،۲۱].

در هر دو نوع ریزش شبکه های AC و DC، چنانچه در میان منابع، کانال های ارتباطی با سرعت بالا وجود داشته باشند، می توان پیچیده ترین طرح های کنترلی را نیز بر روی سیستم پیاده سازی کرد. با این وجود، افزایش تعداد و گستردگی منابع باعث بروز محدودیت های سخت افزاری سیستم کشی و به وجود آمدن اختلافات فیزیکی بین مبدل ها خواهد شد که خود سرآغاز بروز مسائلی نظیر اختلاف ولتاژ و جریان گردشی است [۸].

به طور کلی می توان روش های کنترلی تقسیم بار را به سه نوع کنترل متمرکز، غیرمتمرکز و ترکیبی تقسیم کرد. مشکل اصلی استفاده از روش های متمرکز یا همان روش های مبتنی بر ارتباطات، پیچیدگی زیاد، قابلیت اطمینان پایین، حساسیت نسبت به نویز، گسترش پذیری دشوار و همچنین بالا بودن هزینه اجرای این روش ها است. از دست رفتن هر کانال ارتباطی باعث از دست رفتن واحد متناظر و به تبع آن ایجاد تنش بیش از حد در سایر واحدها و بروز خطاهای زنجیره ای می شود. هر چند روش های غیرمتمرکز مشکلات قبلی را ندارند اما اشکال عمده ای آنها کنترل ولتاژ نسبتاً ضعیف آنها است. روش های ترکیبی نیز سعی دارند مزایای دو روش فوق را

ترکیب کنند [۲,۳,۱۳].

از آنجا که تقسیم توان بین مبدل‌ها متناسب با توان نامی آنها صورت می‌گیرد، از لحاظ تئوری، مبدل‌های با مشخصات یکسان، جریان بار را به طور مساوی بین خود تقسیم می‌کنند. با این حال، مسائلی چون عدم تطابق اجزا، فیدبک‌های سیستم و همچنین امیدانس‌های اتصال به باس DC بین چند مبدل، باعث عدم تعادل در جریان تامین شده به وسیله‌ی هر مبدل می‌گردند. اگر این عدم تعادل زیاد باشد، باعث به وجود آمدن اضافه بار و استرس‌های دمایی می‌شود که قابلیت اطمینان سیستم را به خطر می‌اندازند [۱۸].

در مورد منابع تولید پراکنده‌ی موازی، امیدانس خروجی منبع یا همان مقاومت خط ارتباطی، نقش مهمی را در برهم کنش بار و منابع و تقسیم جریان بار بین منابع ایفا می‌کند [۳].

۲-۴-۱- روش‌های تقسیم بار متمرکز یا فعال

این روش‌ها برای تقسیم بار بین منابع، به ارتباطات نیاز دارند. یعنی باید بین همه‌ی مبدل‌ها و کنترل کننده‌ی مرکزی یک کانال ارتباطی وجود داشته باشد. اطلاعات لحظه‌ای مبدل‌ها اعم از جریان و ولتاژ که برای تقسیم بار توسط کنترل کننده‌ی مرکزی مورد نیاز هستند از طریق این کانال‌ها منتقل می‌شوند. روش‌های کنترل ارباب-برده^۱، کنترل متمرکز، تقسیم بار متوسط^۲ و کنترل زنجیره‌ی دایره‌ای^۳ را می‌توان در این دسته جای داد. در این میان، روش کنترل ارباب-برده کاربرد بیشتری نسبت به روش‌های دیگر دارد. در ادامه به معرفی این روش‌ها می‌پردازیم.

□ روش کنترل متمرکز

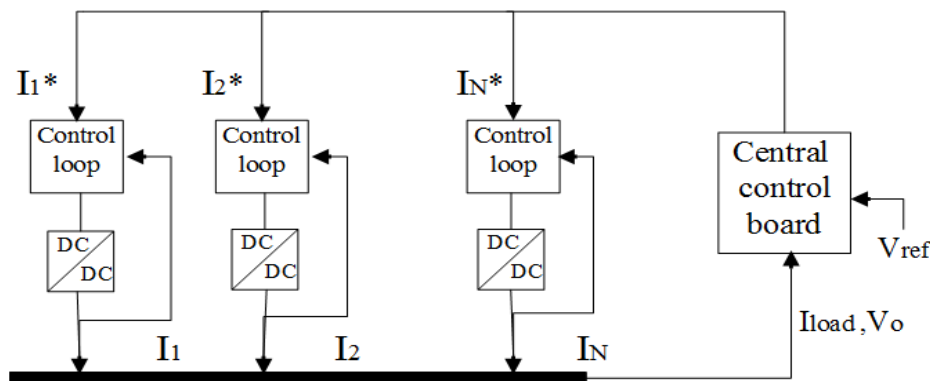
در این طرح، وجود یک کنترل کننده‌ی مرکزی به منظور تعیین جریان مرجع برای هر مبدل ضروری است. مرجع جریان هر مبدل، از تقسیم جریان بار اندازه‌گیری شده توسط کنترل

^۱ Master slave control

^۲ Average load sharing

^۳ circular chain control

کننده‌ی مرکزی بر تعداد مبدل‌های موازی بدست می‌آید. سپس اختلاف این مقدار مرجع از مقدار جریان خروجی هر مبدل به عنوان مقدار خطا، در یک حلقه‌ی کنترل جریان قرار می‌گیرد. به طور همزمان یک حلقه‌ی کنترل خارجی، ولتاژ بار را تنظیم می‌کند [3].



شکل (۳-۲) شماتیک کلی روش کنترل متمرکز [۳].

اشکال اصلی این روش، جدا از ضرورت استفاده از یک کنترل کننده‌ی مرکزی، نیاز به اندازه‌گیری کل جریان بار است که کاربرد این طرح را در سیستم‌های توزیع بزرگ، با محدودیت روبرو می‌کند.

شماتیک کلی روش کنترل متمرکز در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

□ روش کنترل ارباب - برده:

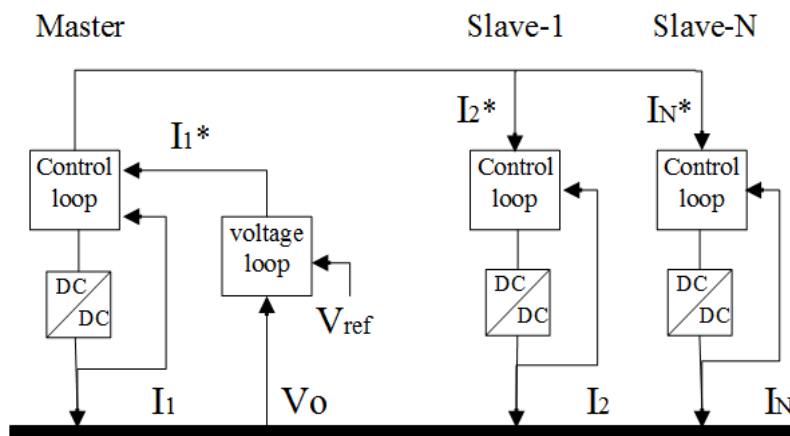
در این طرح اغلب یکی از مبدل‌ها در حالت کنترل شده‌ی ولتاژ^۱ وارد عمل می‌شود (ارباب) که ولتاژ خروجی را برابر با مقدار تعیین شده‌ی نامی تنظیم می‌کند. سایر مبدل‌ها در حالت کنترل شده‌ی جریان^۲ عمل می‌کنند (برده‌ها)، که در واقع جریان‌های خروجی‌شان را تنظیم می‌کنند. کنترل کننده‌ی اصلی (ارباب)، مقدار مرجع جریان را برای سایر مبدل‌ها (برده‌ها)، بر مبنای کل جریان بار محاسبه می‌کند. سپس این مقادیر مرجع به کنترل کننده‌های برده ارسال شده و توسط آن‌ها پیگیری می‌شوند [۱،۳،۱۸].

^۱ Voltage control mode

^۲ Current control mode

طرح کنترل ارباب-برده برای تبادل سیگنال‌های تقسیم توان بین یک واحد اصلی (ارباب) و سایر واحدها (برده‌ها) از کانال ارتباطی با پهنای باند زیاد استفاده می‌کند. اگرچه روش کنترل ارباب-برده، تنظیم ولتاژ و تقسیم بار خوبی را نتیجه می‌دهد اما استفاده از آن به دلیل هزینه و پیچیدگی زیاد، قابلیت اطمینان پایین و بسط پذیری دشوار محدود می‌شود. برای افزایش قابلیت اطمینان این سیستم‌ها در برخی از مراجع، استفاده از ارتباطات بی-سیم به جای ارتباطات کابلی پیشنهاد می‌شود ولی در عین حال وجود یک کنترل کننده‌ی اصلی به عنوان نقطه‌ی شکست سیستم باعث پایین آمدن قابلیت اطمینان سیستم می‌شود [۲۱].

شماتیک کلی روش کنترلی ارباب-برده در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.

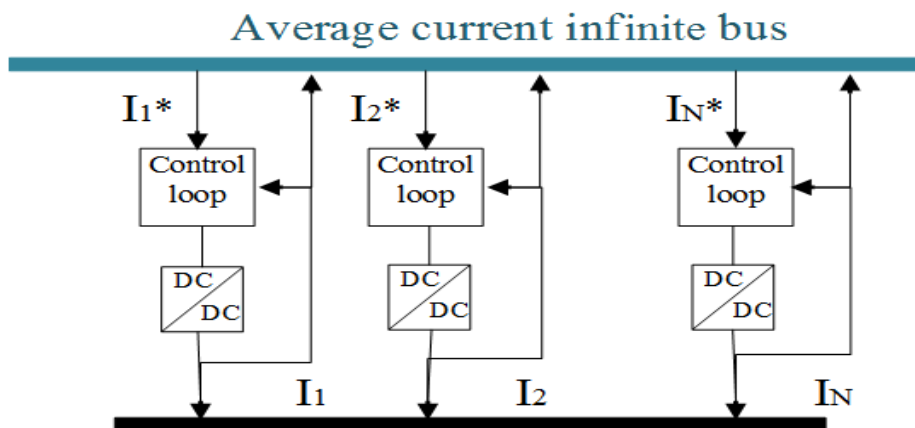


شکل (۲-۴) شماتیک کلی روش کنترلی ارباب-برده [۳].

□ روش تقسیم بار متوسط

در این روش تنها از یک کانال (سیم) منفرد که اطلاعات جریان متوسطی را که توسط مقاومت متصل به حسگر جریان هر مبدل محاسبه شده است دربردارد، استفاده می‌شود. متوسط جریان همه‌ی مبدل‌ها، به عنوان مرجع جریان هر مبدل در نظر گرفته می‌شود. این طرح کنترلی به دلیل عدم وجود رابطه‌ی ارباب - برده بین مبدل‌ها، قابل اطمینان‌تر است. در ضمن بسط پذیری راحت‌تری نسبت به روش ارباب - برده دارد [۳].

شماتیک کلی پیاده سازی این روش در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.

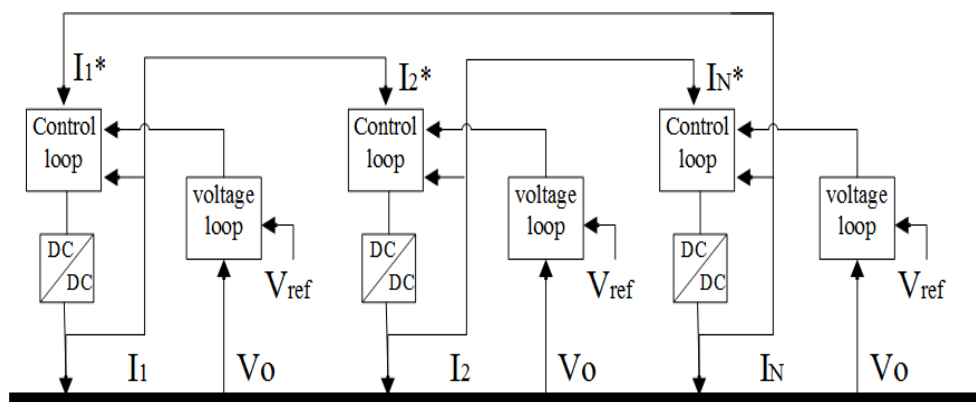


شکل (۲-۵) شماتیک کلی روش تقسیم بار متوسط [۳].

□ روش زنجیره‌ی دایره‌ای

در این طرح، مرجع جریان هر مبدل از مبدل قبلی گرفته می‌شود که این کار یک حلقه‌ی کنترل را تشکیل می‌دهد. واضح است که برای تشکیل زنجیره‌ی دایره‌ای، مرجع جریان اولین واحد، از مرجع جریان آخرین واحد بدست می‌آید. در این حالت، یک منطق ارباب - برده وجود دارد. به طوری که ولتاژ توسط مبدل اصلی کنترل می‌شود (مبدل تحت کنترل ولتاژ) و مبدل‌های برده نیز جریان بار را تقسیم می‌کنند (مبدل‌های تحت کنترل جریان). در این حالت زنجیره‌ی دایره‌ای تنها به وسیله‌ی مبدل‌های برده تشکیل می‌شود و مبدل اصلی از این قضیه مستثنی می‌گردد. فرمان جریان هر مبدل برده توسط مبدل قبلی‌اش تولید می‌شود [۳].

شماتیک کلی پیاده سازی این روش در شکل (۲-۶) نشان داده شده است.



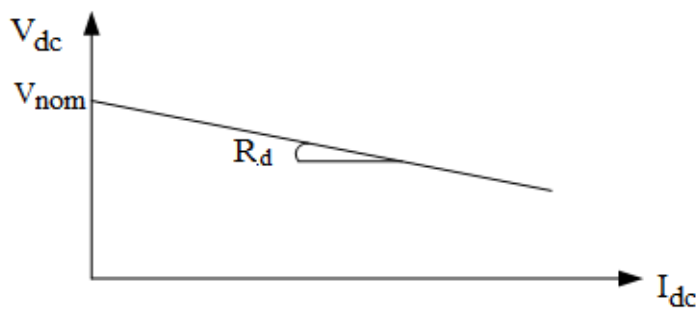
شکل (۲-۶) شماتیک کلی روش تقسیم بار متوسط [۳].

۲-۴-۲- روش‌های تقسیم بار غیرمتمرکز یا غیرفعال

□ روش کنترل اف‌تی متداول

روش کنترل اف‌تی متداول به دلیل سادگی، اثرگذاری خوب و همچنین عدم نیاز به ارتباطات، به یک روش محبوب و مرسوم برای تقسیم جریان بار در ریزشبه‌های DC تبدیل شده است [۲۵-۲۱، ۱۲، ۲]. در این روش همه‌ی مبدل‌های موازی در حالت کنترل شده‌ی ولتاژ عمل می‌کنند. در این روش چون مرجع ولتاژ برای هر مبدل به صورت محلی تولید می‌شود، هیچ ارتباطی بین مبدل‌ها لازم نیست [۲۶].

دو مشخصه‌ی ولتاژ-جریان (V-I) و ولتاژ-توان (P-I) برای کنترل اف‌تی در ریزشبه‌های DC به کار می‌روند [۲۷]. متداول‌ترین روش کنترل اف‌تی که بیشترین استفاده را دارد روش کنترل مبتنی بر مشخصه‌ی اف‌تی ولتاژ-جریان است که در شکل (۷-۲) نشان داده شده است [۷].



شکل (۷-۲) مشخصه‌ی اف‌تی ولتاژ-جریان مورد استفاده در ریزشبه‌ی DC.

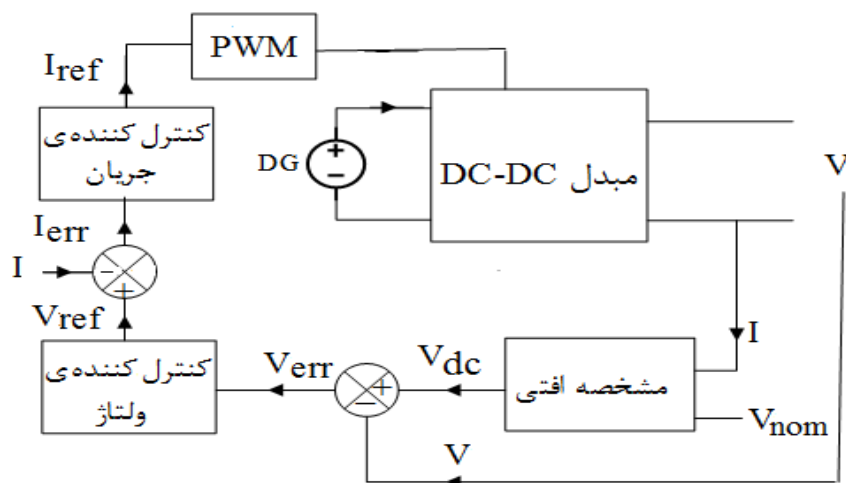
کنترل اف‌تی به صورت یک مقاومت مجازی بر روی حلقه‌ی کنترل ولتاژ ظاهر می‌شود که با افزایش جریان خروجی باعث کاهش خطی ولتاژ مبدل می‌شود. یعنی مرجع ولتاژ خروجی مبدل بر اساس جریان خروجی آن کنترل می‌شود [۳۰-۲۸، ۱۲].

در این روش، هر یک از مبدل‌ها که جریان بیشتری داشته باشد به ازای ضریب اف‌تی مشابه، کاهش بیشتری در ولتاژ مرجع اعمال شده به آن مبدل ایجاد خواهد شد که این عمل باعث کاهش جریان خروجی آن مبدل می‌گردد. این روش کنترلی را می‌توان به صورت زیر فرمول بندی کرد:

$$V_{dc} = V_{nom} - R_d i \quad (۴-۲)$$

که V_{dc} ولتاژ خروجی مبدل، V_{nom} ولتاژ نامی مبدل، R_d ضریب افتی و i جریان خروجی مبدل می‌باشند [1,7,18,28]. ضریب افتی برای هر مبدل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که حاصل ضرب آن در جریان نامی مبدل، مقدار یکسانی برای تمامی مبدل‌ها داشته باشد. این در شرایط ایده‌آل تضمین می‌کند که جریان بار، متناسب با ظرفیت نامی مبدل‌ها بین آنها تقسیم شود. با این وجود، به دلیل خطای کوچک در ولتاژ نامی مبدل‌ها و یکسان نبودن مقاومت خطوط، جریان‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای از مقادیر نامی‌شان منحرف می‌شوند. بالا رفتن ضرایب افتی باعث کاهش این انحراف می‌شود ولی از طرف دیگر باعث بدتر شدن تنظیم ولتاژ می‌گردد [۷].

شکل کلی یک مبدل تحت کنترل افتی در شکل (۸-۲) نشان داده شده است.



شکل (۸-۲) شماتیک کلی یک مبدل تحت کنترل افتی.

در حالت کلی با در نظر گرفتن مقاومت خط در یک ریزشبه‌ی DC دارای کنترل افتی، از آنجایی که ولتاژ خروجی مبدل‌ها نمی‌توانند دقیقاً یکسان باشند، بین مبدل‌ها جریان گردشی ایجاد شده و صحت تقسیم جریان خروجی کاهش می‌یابد. همچنین انحراف ولتاژ باس مشترک DC، با افزایش جریان بار، افزایش می‌یابد. به علاوه، استفاده از یک مقاومت مجازی بزرگ، پایداری سیستم را نیز به مخاطره می‌اندازد [۱۱،۱۵].

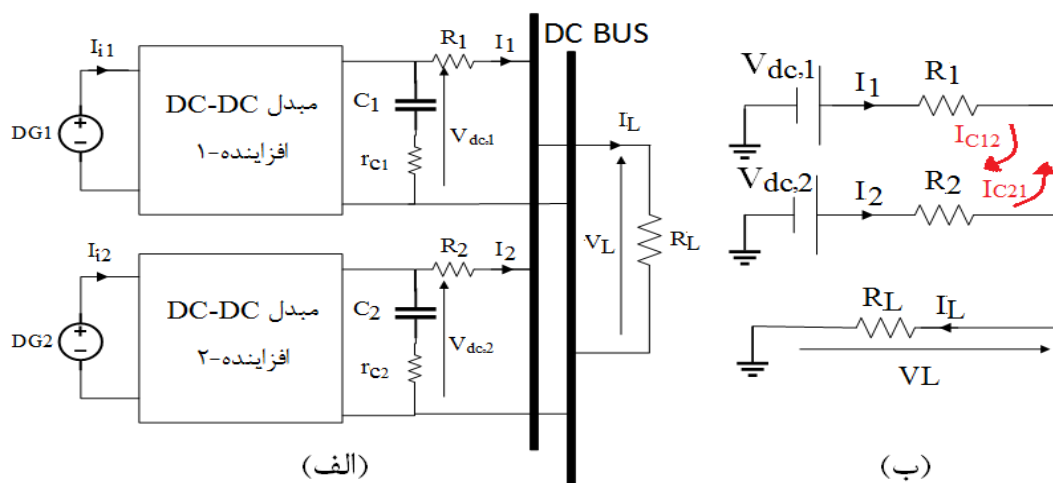
تقسیم صحیح جریان بار تنها در حالتی رخ می‌دهد که مقاومت‌های خط اتصال و مرجع‌های اسمی ولتاژ، در هر مبدل با مبدل دیگر یکسان باشد [۲۰]. در حالت کلی، برای دستیابی به یک تقسیم بار مناسب، ضرایب افتی باید برای در نظر گرفتن اثر مقاومت‌های خط ارتباطی و تغییرات

بار، تغییر یابند. همچنین از آنجایی که اکثر منابع تجدیدپذیر توان نامی ثابتی ندارند، لازم است با تغییرات توان نامی، ضرایب افتی نیز متناسب با آنها تغییر کنند [۲].

کنترل افتی متداول نمی‌تواند به طور همزمان هم تقسیم صحیح جریان و هم تنظیم ولتاژ قابل قبولی را فراهم سازد [۲۵، ۱۰-۲]. این روش بدون توجه به مقدار انحراف ولتاژ لحظه‌ای، از یک ضریب افتی ثابت استفاده می‌کند. لازم به ذکر است که به دلیل ماهیت کاهش‌ی مشخصه‌ی افتی، استفاده از این روش همیشه افت ولتاژ در باس مشترک DC را نیز به همراه خواهد داشت. این مشکلات به دلیل بروز خطا در اندازه‌گیری سیگنال‌های فیدبک ولتاژ و جریان، عدم تطابق مراجع ولتاژ و مقاومت‌های نابرابر کابل‌ها رخ می‌دهد [۱۵، ۷، ۲].

۲-۵- سیستم مورد مطالعه

در این قسمت، ریزشبه‌ی DC مورد مطالعه در این تحقیق تشریح می‌شود. شکل (۲-۹) (الف) دو مبدل DC-DC افزاینده با اتصال موازی را نشان می‌دهد که منبع تغذیه‌ی و باس DC را به هم متصل می‌کنند. در این شکل $V_{dc,1}$ ، $V_{dc,2}$ ، I_1 ، I_2 ، R_1 ، R_2 ، I_{C12} و I_{C21} به ترتیب ولتاژها و جریان‌های خروجی، مقاومت‌های خط اتصال و جریان‌های گردشی مبدل ۱ و مبدل ۲ و R_L و I_L بار و جریان بار سیستم هستند. سمت خروجی مبدل را می‌توان به صورت یک منبع ولتاژ سری با مقاومت کابل نشان داد. مدار معادل آن در شکل (۲-۹) (ب) نشان داده شده است.



شکل (۲-۹) (الف) مبدل‌های DC-DC موازی (ب) مدار معادل حالت ماندگار برای سمت خروجی DC [۵].

برای محاسبه‌ی جریان گردش‌ی یک سیستم با دو مبدل موازی، با اعمال قانون KVL در شکل (۲-۹ ب) بدون در نظر گرفتن ضرایب افتی می‌توان نوشت:

$$V_{dc,1} = I_1 R_1 + I_L R_L \quad (۵-۲)$$

$$V_{dc,2} = I_2 R_2 + I_L R_L \quad (۶-۲)$$

جریان‌های I_1 و I_2 را می‌توان با استفاده از روابط (۲-۵) و (۲-۶) به صورت زیر بدست آورد:

$$I_1 = \frac{(R_1 + R_L)V_{dc,1} - R_L V_{dc,2}}{R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L} \quad (۷-۲)$$

$$I_2 = \frac{(R_2 + R_L)V_{dc,2} - R_L V_{dc,1}}{R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L} \quad (۸-۲)$$

همچنین، جریان گردش‌ی را می‌توان به شکل رابطه‌ی زیر بیان کرد:

$$I_{C12} = -I_{C21} = \frac{V_{dc,1} - V_{dc,2}}{R_1 + R_2} = \frac{I_1 - I_2}{2} \quad (\text{if } R_1 = R_2) \quad (۹-۲)$$

$$= \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{if } R_1 \neq R_2)$$

در روابط فوق چون R_L خیلی بزرگتر از R_1 و R_2 است، می‌توان از حاصلضرب $R_1 R_2$ چشم‌پوشی کرد. با جایگذاری (۲-۹) در (۲-۷) و (۲-۸) می‌توان نوشت [۵]:

$$I_1 = \underbrace{\frac{R_2 V_{dc,1}}{R_1 R_L + R_2 R_L}}_{\text{Load current}(I_1)} + \underbrace{\frac{V_{dc,1} - V_{dc,2}}{R_1 + R_2}}_{\text{Circulating current}(I_{C12})} \quad (۱۰-۲)$$

$$I_2 = \underbrace{\frac{R_1 V_{dc,2}}{R_1 R_L + R_2 R_L}}_{\text{Load current}(I_2)} + \underbrace{\frac{V_{dc,2} - V_{dc,1}}{R_1 + R_2}}_{\text{Circulating current}(I_{C21})} \quad (۱۱-۲)$$

با استفاده از تحلیل فوق، می‌توان ملاحظه کرد که تقسیم بار با توجه به ولتاژ خروجی هر

مبدل و مقاومت کابل آن تعیین می شود.

۶-۲- مدل بار در ریزشبهه های DC

در ریزشبهه های DC می توان بارها را به سه نوع کلی بارهای مقاومت ثابت^۱، بارهای جریان ثابت^۲ و بارهای توان ثابت^۳ تقسیم بندی کرد. لامپ های رشته ای، قهوه سازها و کوره های الکتریکی را می توان به عنوان بارهای مقاومت ثابت در نظر گرفت. سیستم های روشنایی LED معمولاً توسط مدارهای جریان ثابت کنترل می شوند، بنابراین می توانند به عنوان بارهای جریان ثابت در نظر گرفته شوند. علاوه بر این شارژرهای باتری نیز در حالت جریان ثابت کار می کنند و در دسته ی بارهای جریان ثابت طبقه بندی می شوند. بارهای توان ثابت عموماً دستگاه های الکترونیکی نظیر مراکز داده، کامپیوترها و مانیتورها و موتورهای الکتریکی کنترل شده توسط مبدل های قدرت که در وضعیت توان ثابت کار می کنند را شامل می شوند [۳۱].

می توان رابطه ی بین جریان و ولتاژ بارهای مختلف را به صورت زیر بیان کرد [۳۱]:

- بارهای مقاومت ثابت:

$$i_{CRL} = (1/R_{Load})V = (P_{CRL}/V_{nom}^2)V \quad (۱۲-۲)$$

که R_{Load} بار مقاومت ثابت، V_{nom} ولتاژ نامی و V ، i_{CRL} و P_{CRL} به ترتیب ولتاژ، جریان و توان بار مقاومت ثابت هستند.

- بارهای جریان ثابت:

$$i_{CCL} = I_{const} = (P_{CCL}/V_{nom}) \quad (۱۳-۲)$$

^۱ Constant resistance load

^۲ Constant current load

^۳ Constant power load

که P_{CCL} و i_{CCL} ، V_{nom} به ترتیب ولتاژ نامی، جریان و توان بار جریان ثابت هستند.
- بارهای توان ثابت:

$$i_{CPL} = (P_{CPL}/V) \quad (14-2)$$

که P_{CPL} و i_{CPL} ، V به ترتیب ولتاژ، جریان و توان بار توان ثابت هستند.
بارهای توان ثابت را می توان به صورت مقاومتی که همیشه ولتاژ دو سر آن ثابت است در نظر گرفت. برای این کار می توان مقاومت را توسط یک مبدل DC-DC به باس مشترک متصل کرد. معادله ی مشخصه ی این بارها توسط رابطه ی زیر بیان می شود:

$$P_{CPL} = v \times i_{CPL} \quad (15-2)$$

همچنین امپدانس نموی^۱ یک بار توان ثابت را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\left. \frac{\partial v}{\partial i_{CPL}} \right|_{(v, I_{CPL})} = \frac{\partial}{\partial i_{CPL}} \left(\frac{P_{CPL}}{i_{CPL}} \right) \Big|_{(v, I_{CPL})} = -\frac{P_{CPL}}{I_{CPL}^2} = -\frac{V}{I_{CPL}} \quad (16-2)$$

رابطه ی فوق نشان می دهد که بارهای توان ثابت دارای امپدانس نموی منفی هستند، این ویژگی باعث کاهش میرایی سیستم می شود و بر پایداری سیستم تاثیر منفی می گذارد [۳۲، ۳۳].

۷-۲- سیستم های ذخیره سازی انرژی^۲

به این خاطر که اکثر منابع تولید پراکنده مثل سلول های خورشیدی و توربین های بادی بسته به شرایط محیطی تولید توان می کنند، برای تامین انرژی پایدار و با کیفیت مخصوصا در ریز- شبکه ها که عموما توسط منابع تولید پراکنده تغذیه می شوند، به استفاده از باتری ها برای ذخیره سازی انرژی نیاز است [۸].

^۱ Incremental impedance

^۲ Energy storage systems

کنترل نحوه‌ی شارژ و دشارژ این باتری‌ها به منظور افزایش راندمان و طول عمر آنها و همچنین تامین پایدار توان امری ضروری است. عموماً برای کنترل شارژ و دشارژ باتری‌ها در ریز- شبکه‌ها از مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده می‌شود. روش‌های کنترل شارژ باتری نیز شبیه به روش‌های تقسیم توان بین مبدل‌ها است به این صورت که جریان توان متناسب با ظرفیت و با توجه به وضعیت شارژ^۱ باتری‌ها بین آنها تقسیم می‌شود.

۸-۲- بررسی عملکرد روش کنترل افتی متداول

همانطور که اشاره شد، به این دلیل که روش کنترل افتی متداول بدون در نظر گرفتن شرایط بارگذاری و انحراف ولتاژ لحظه‌ای و همچنین مشخصات سیستم نظیر مقاومت‌های خطوط، از یک ضریب افتی ثابت برای تقسیم بار بین مبدل‌ها استفاده می‌کند لذا توانایی فراهم کردن صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ به صورت همزمان و متناسب با تغییر شرایط بارگذاری را ندارد. مراجع [4,19] به بررسی مشخصات سیستم نظیر تنظیم ولتاژ، صحت تقسیم جریان، تلفات و اثرات ناپایدار کننده‌ی بارهای توان ثابت با توجه به تغییرات ضریب افتی سیستم می‌پردازند. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزایش ضریب افتی، بر روی صحت تقسیم جریان و پایدار سازی بارهای توان ثابت اثر مثبتی دارد ولی تنظیم ولتاژ و بازدهی سیستم را به خطر می‌اندازد. بسیاری از مراجع در بررسی عملکرد روش کنترل افتی متداول، تفاوت مقاومت‌های خطوط را به عنوان عامل اصلی بروز اختلاف جریان در نظر می‌گیرند ولی برخی از مراجع نظیر [۷] از اختلاف مقاومت‌های خطوط چشم پوشی می‌کنند و به بررسی اثر اختلاف مراجع ولتاژ مبدل‌ها و خطا در اندازه‌گیری سیگنال‌های فیدبک ولتاژ و جریان بر روی تقسیم بار سیستم می‌پردازند. مرجع [۱۶] بیان می‌کند که با صرف نظر کردن از مقاومت خطوط، به ضرایب افتی کوچکی برای دستیابی به تقسیم جریان صحیح نیاز است ولی با در نظر گرفتن اثر مقاومت خطوط، به ضرایب افتی بزرگتری برای دستیابی به تقسیم جریان صحیح نیاز خواهد بود.

^۱ State of charge

۹-۲-۹- ارائه‌ی راهکارهایی برای بهبود روش کنترل اف‌تی

به طور کلی هدف از روش‌های ارائه شده در این قسمت، ارائه‌ی راهکارهایی برای دستیابی به صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ قابل قبول به طور همزمان است. برخی روش‌ها با تعیین ضرایب اف‌تی مناسب و برخی با ایجاد تغییر در مشخصه‌ی اف‌تی متداول سعی در بهبود عملکرد تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ این روش دارند. در ادامه تعدادی از این روش‌ها بررسی می‌شوند.

۹-۲-۱- روش‌های تعیین مقدار ضریب اف‌تی مناسب

در قسمت‌های قبل به دو نکته‌ی مهم در خصوص انتخاب ضرایب اف‌تی اشاره شد. ابتدا اینکه باید ضرایب اف‌تی به گونه‌ای انتخاب شوند که بتوانند مصالحه‌ای بین صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ سیستم برقرار کنند. دوم اینکه انتخاب ضرایب اف‌تی ثابت، بدون توجه به میزان بارگذاری سیستم موجب بروز خطای تقسیم جریان به ازای ضرایب اف‌تی کوچک در شرایط بارگذاری زیاد و همچنین تنظیم ولتاژ بالا به ازای ضرایب اف‌تی بزرگ در شرایط بارگذاری کم خواهد شد. لذا باید در انتخاب ضریب اف‌تی مناسب، شرایط بارگذاری سیستم را نیز لحاظ کرد. پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه برای دستیابی به این دو مهم، روش‌هایی را پیشنهاد می‌دهند که در ادامه تعدادی از آنها معرفی می‌شود.

□ روش‌های تعیین ضریب اف‌تی بهینه

- روش کنترل اف‌تی تطبیقی

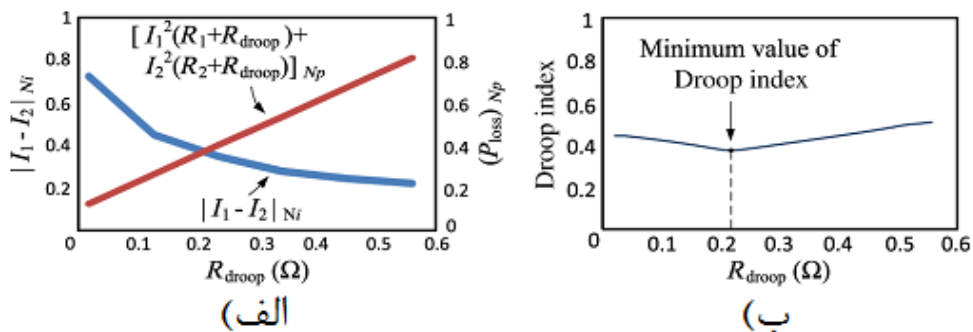
مرجع [۵]، به منظور بهبود عملکرد ریزش شبکه‌ی DC، یک روش کنترل اف‌تی تطبیقی پیشنهاد می‌دهد. در این مرجع، شاخصی تحت عنوان شاخص اف‌تی (DI)^۲ معرفی می‌شود که تابعی

^۱ Tradeoff

^۲ Droop index

از اختلاف تقسیم جریان و تلفات سمت خروجی مبدل‌ها است. روش ارائه شده قادر است با استفاده از جابجایی ضریب افتی، مصالحه‌ی بین اختلاف تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ را از بین ببرد. کار انجام شده در این مرجع، شامل دو قسمت تعیین ضریب افتی بهینه توسط شاخص افتی و استفاده از روش جابجایی ضریب افتی برای بهبود ولتاژ خروجی مبدل‌ها است.

با توجه به اینکه با افزایش ضریب افتی، مقدار اختلاف تقسیم جریان و تلفات سمت خروجی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. این مرجع شاخصی را برای یافتن نقطه‌ی تلاقی این دو نمودار معرفی می‌کند. یافتن این نقطه مطابق آنچه در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است، عملکرد بهتری از نظر تقسیم جریان و کاهش جریان گردشی را موجب خواهد شد. سپس روش جابجایی ضریب افتی از طریق کاهش مقدار ضریب افتی مبدل دارای ولتاژ خروجی کمتر به اجرا در می‌آید.



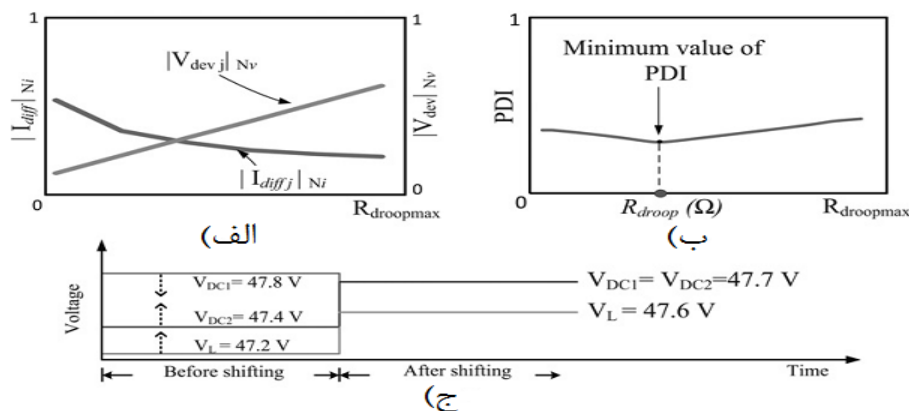
شکل (۲-۱۰) رابطه (الف) اختلاف تقسیم جریان و تلفات خروجی با تغییر R_d (ب) شاخص افتی و R_d [۵].

محاسبه حداقل شاخص افتی، با در نظر گرفتن فرض‌های $x = V_{dc,1}/V_{dc,2}$ ، $y = R_1/R_2$ و $R_{d1} = yR_{d2}$ صورت می‌گیرد که با توجه به رابطه $I_2/I_1 = (R_1 + R_{d1})/(R_2 + R_{d2})$ ، منجر به y برابر شدن I_2 نسبت به I_1 می‌شود که این اشکال اصلی روش پیشنهاد شده است. البته این نقص در ادامه با اجرای روش جابجایی ضریب افتی برطرف خواهد شد ولی دیگر نمی‌توان بیان کرد که این روش توانسته بهترین ضریب افتی را با توجه به شاخص ارائه شده بیابد.

- روش کنترل افتی اصلاح شده

در مرجع [۱]، یک روش کنترل افتی اصلاح شده به منظور بهبود عملکرد تقسیم بار در ریزشکبه‌ی DC معرفی می‌شود. در این مرجع برای یافتن مقدار ضرایب افتی بهینه، یک شاخص

افتی تناسبی (PDI)^۱، که تابعی از اختلاف تقسیم جریان و انحراف ولتاژ در سمت خروجی مبدل است، همراه با روش جابجایی ضریب افتی معرفی می‌شود. این روش اجازه می‌دهد مبدل بر اساس توان در دسترس سیستم فوتولتائیک، جریان بار را به اشتراک بگذارد. روش کنترلی پیشنهاد شده در این مرجع عبارتست از محاسبه‌ی ضریب افتی بهینه به وسیله‌ی یافتن نقطه‌ی تلاقی نمودارهای اختلاف تقسیم جریان و انحراف ولتاژ خروجی مبدل مطابق شکل (۲-۱۱) و استفاده از روش جابجایی ضریب افتی برای بهبود ولتاژهای خروجی.



شکل (۲-۱۱) رابطه بین (الف) اختلاف تقسیم جریان نرمالیزه شده و تنظیم ولتاژ خروجی با تغییر در R_{droop} (ب) شاخص افتی تناسبی و R_d (ج) کنترل ولتاژ خروجی با جابجایی R_d برای تقسیم بار یکسان [۱].

مزیت این کار نسبت به مرجع [۵]، استفاده از حاصلضرب توان نامی مبدل در جریان بار به عنوان جریان مرجع مبدل است. با این کار می‌توان تضمین کرد که هر مبدل متناسب با ظرفیت نامی خود جریان بار را تامین می‌کند. ولی در این مرجع نیز برای محاسبه‌ی جریان مبدل‌ها، فرض‌هایی مشابه آنچه در مرجع [۵] بیان شد در نظر گرفته شده‌اند که باز هم منجر به γ برابر شدن I_2 نسبت به I_1 می‌شود که اشکال اصلی این روش است. البته به طور مشابه این نقص با اجرای روش جابجایی ضریب افتی برطرف خواهد شد ولی دیگر ضرایب افتی با توجه به شاخص ارائه شده بهینه نیستند. اشکال دیگر روش‌های بیان شده در مراجع [۵] و [۱]، نیاز آنها به وجود ارتباطات بین مبدل‌ها برای انتقال مقادیر ولتاژ و جریان به کنترل کننده‌ها است.

^۱ Proportional droop index

- روش بهینه سازی مشخصات افتی

از آنجا که توپولوژی ریزشبهه و وضعیت بارگذاری، اثر قابل توجهی بر روی صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ دارند. در مرجع [۳۴]، یک فرایند بهینه سازی با استفاده از همه‌ی اطلاعات مورد نیاز برای یافتن مقدار ضرایب بهینه‌ی روش افتی با توجه به مدل تصادفی بار معرفی می‌شود. در ابتدا یک مسئله‌ی بهینه سازی با محدودیت‌های لازم و یک تابع هزینه به صورت مجموع خطای تقسیم جریان و انحراف ولتاژ تحت بارگذاری‌های مختلف، معرفی می‌شود. سپس، از یک ابزار بهینه سازی بر مبنای الگوریتم ازدحام ذرات برای همگرا کردن پاسخ‌های مسئله استفاده می‌شود. در طول محاسبات، تاثیر خطای تقسیم جریان در هر بارگذاری بر اساس احتمال وقوع آن، که از مدل بارگذاری تصادفی برای ریزشبهه‌ی مورد مطالعه به دست می‌آید وزن دهی می‌شود. محدودیت عمده‌ی این روش، ساختار کنترلی متمرکز و نیاز به ارتباط بین مبدل‌هاست که باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد.

□ روش‌های مبتنی بر منطق فازی

- روش کنترل مشارکتی^۱ بر مبنای کنترل افتی

در ریزشبهه‌ها معمولاً برای اطمینان از پاسخگویی به افزایش احتمالی تقاضا، از واحدهای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود. با این حال، استفاده از واحدهای ذخیره سازی انرژی نیز چالش‌هایی را در زمینه‌ی کنترل ریزشبهه‌ها به وجود می‌آورند. به طور مثال، سیستم ذخیره سازی انرژی باید به منظور جلوگیری شارژ و دشارژ بیش از حد، کنترل شود. مرجع [۳۵] یک استراتژی جدید غیرمتمرکز مبتنی بر منطق فازی پیشنهاد می‌دهد که انرژی ذخیره شده را با تغییر مقاومت مجازی کنترل کننده‌های افتی مطابق با وضعیت شارژ هر واحد ذخیره سازی کنترل می‌کند. علاوه بر این، مقاومت مجازی برای کاهش انحراف ولتاژ در باس DC، تنظیم می‌شود.

سیستم کنترل فازی پیشنهاد شده، امپدانس مجازی کنترل کننده‌های افتی را مطابق با حالت شارژ هر ذخیره ساز انرژی تنظیم می‌کند. در همین حال، سیستم کنترل استنتاج فازی^۲

^۱ Cooperative control

^۲ Fuzzy logic control

قادر به تنظیم مقاومت مجازی مطابق با ولتاژ باس DC به منظور کاهش انحراف ولتاژ خواهد بود. از آنجا که باتری با کمترین ضریب افتی، جریان بیشتری تزریق / استخراج می‌کند و سریعتر از دیگر واحدها، شارژ یا دشارژ می‌شود، برای اطمینان از تعادل انرژی ذخیره شده، نیاز است که باتری با کمترین میزان حالت شارژ سریعتر از دیگر باتری‌ها شارژ شود. به همین خاطر، باید کوچکترین ضریب افتی به آن باتری اختصاص داده شود و بالعکس. به این ترتیب، سیستم استنتاج فازی پیشنهادی از حالت شارژ باتری و انحراف ولتاژ به عنوان ورودی استفاده می‌کند و مقاومت مجازی را به عنوان خروجی نتیجه می‌دهد.

۲-۹-۲-۲- ارائه‌ی مشخصه‌های افتی بهبود یافته

- روش کنترل اتوماتیک برای تقسیم بار در ریزشبه‌های DC

مرجع [۴] یک روش جدید کنترل تطبیقی برای تقسیم بار در ریزشبه‌های DC پیشنهاد می‌کند که بسته به شرایط بارگذاری، هم تقسیم جریان صحیح و هم تنظیم ولتاژ قابل قبولی را فراهم می‌کند. این روش کنترل تطبیقی با افزایش جریان بار، ضرایب افتی معادل را افزایش می‌دهد که موجب تقسیم صحیح جریان خواهد شد.

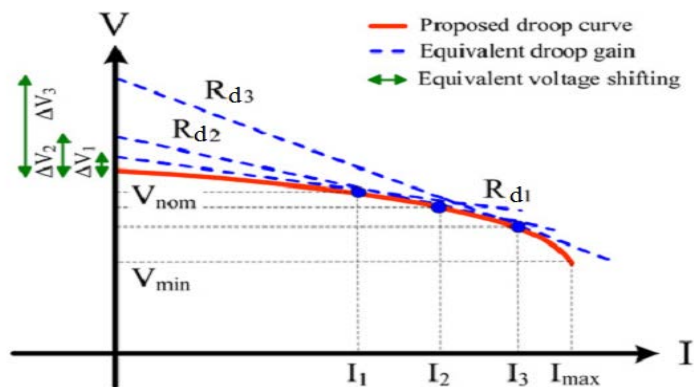
از آنجا که در جریان بار کم، توان واحدهای تولید پراکنده از توان اسمی آنها کمتر است، جریان خروجی واحدهای تولید پراکنده از حدود ماکزیمم خود دور هستند. لذا صحت تقسیم جریان موضوع بحث نیست و فقط کافی است تنظیم ولتاژ مقدار قابل قبولی داشته باشد. به علاوه تا آنجا که به تنظیم ولتاژ و بازده سیستم مربوط می‌شود، داشتن ضریب افتی کوچک در شرایط بارگذاری کم، بهتر است. با این وجود با افزایش جریان بار احتمال دارد که واحدهای تولید پراکنده به سمت شرایط اضافه بار حرکت کنند که مطلوب نیست. به علاوه با افزایش توان بارهای توان ثابت، ممکن است ولتاژ باس DC نوساناتی را تجربه کند. بنابراین برای بهتر شدن صحت تقسیم جریان و کاهش اثرات ناپایدار کننده‌ی بارهای توان ثابت، مطلوبست ضرایب افتی افزایش پیدا کنند که در نتیجه از شرایط اضافه بار اجتناب شود.

برای این منظور مرجع [۴] مشخصه‌ی افتی جدیدی را به صورت زیر پیشنهاد می‌دهد:

$$V_{dc,i} = V_{nom} - m_i i_i^\alpha \quad (17-2)$$

$$m_i = \frac{V_{nom} - V_{min}}{I_{max,i}^\alpha} \quad (18-2)$$

که در آن V_{nom} ولتاژ مرجع، i_i جریان خروجی، $V_{dc,i}$ ولتاژ باس DC، $I_{max,i}$ حداکثر جریان خروجی منبع i ام و V_{min} حداقل ولتاژ قابل قبول هستند. بعلاوه m_i و α به ترتیب ثابت و ضریب منحنی افقی هستند. باید ذکر شود که ثابت منحنی افقی m_i چنان تعیین می‌گردد که انحراف ولتاژ، از دامنه‌ی قابل قبول در هر جریان بار بیشتر نشود. شکل (۱۲-۲) مشخصه‌ی افقی اتوماتیک پیشنهاد شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲-۲) مشخصه‌ی روش کنترل افقی اتوماتیک [۴].

مقدار ضریب منحنی افقی α را می‌توان بر اساس مقاومت‌های خط و صحت تقسیم جریان مطلوب محاسبه کرد.

- روش کنترل غیرخطی بیشترین ضریب افقی

مرجع [۳۶] برای افزایش دقت تقسیم جریان در میان منابع و بهبود تنظیم ولتاژ DC، یک تکنیک کنترل غیرخطی جدید پیشنهاد می‌دهد. روش پیشنهادی، روشی کاملاً غیرمتمرکز است و فقط به اطلاعات محلی نیاز دارد. از آنجایی که هیچ کانال ارتباطی مورد نیاز نیست، اجرای آن آسان و قابلیت اطمینان آن بالا خواهد بود.

در روش کنترل افقی متداول، نیاز است که بین تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ یک مصالحه برقرار شود. با این حال، برای یک انحراف ولتاژ مشخص، تقسیم جریان می‌تواند توسط بهینه‌سازی

مسیر افقی بهبود بیشتری یابد. برای یک انحراف ولتاژ مشخص، راه های مختلفی برای رسم یک منحنی افقی از حالت بی باری به حالت بار کامل مبدل وجود دارد. مجموعه ای از منحنی های افقی بین دو نقطه می توانند توسط معادله ی زیر به نمایش درآیند:

$$V_{dc,i} = V_{nom,i} + K_i (I_i)^n; n \in R^+ \quad (19-2)$$

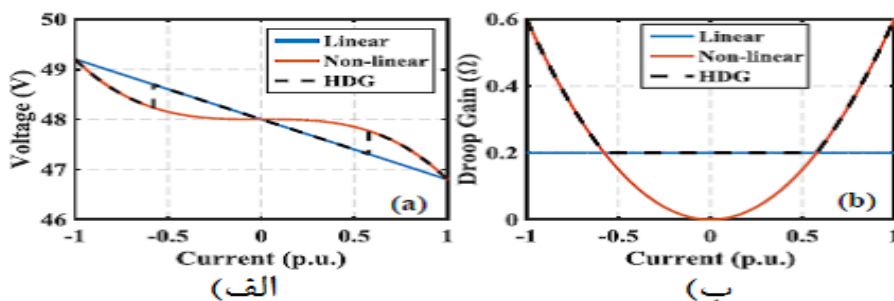
$$K_i = \frac{V_{nom,i} - V_{dc,i}}{(I_{i,max})^n}$$

که $V_{dc,i}$ ، $V_{ref,i}$ ، I_i ، $I_{i,max}$ و K_i به ترتیب ولتاژ خروجی، ولتاژ نامی، جریان خروجی، حداکثر جریان خروجی و ضریب تصحیح ولتاژ مبدل نام هستند. ضریب افقی معادل R_{di} به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$R_{di} = \left| \frac{dV_{dc,i}}{dI_i} \right| = n \times K_i \times (I_i)^{n-1} \quad (20-2)$$

در مرجع [۳۶]، برای رسیدن به بهترین تعادل بین تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ، روش افقی غیر خطی جدیدی پیشنهاد می شود. به این صورت که در هر شرایط بارگذاری، مقدار مطلق شیب منحنی افقی خطی ($n = 1$) و منحنی افقی غیرخطی ($n = 3$) با یکدیگر مقایسه می شوند و منحنی با شیب بالاتر برای تولید مرجع ولتاژ خروجی انتخاب می شود.

همانطور که در شکل (۲-۱۳) دیده می شود، این روش بر خلاف روش افقی غیرخطی، ضریب افقی بالاتری را در شرایط بارگذاری کم ارائه می دهد. همچنین بر خلاف روش افقی خطی، با ارائه ی یک ضریب افقی بالاتر، تقسیم جریان بهتری را در شرایط بارگذاری زیاد فراهم می کند.



شکل (۲-۱۳) الف) مشخصه ی افقی و ب) ضریب افقی، برای روش های کنترل افقی خطی، غیرخطی و روش بیشترین ضریب افقی [۱۹].

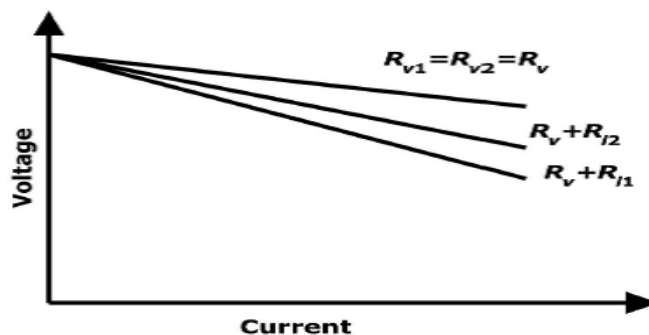
محدودیت اصلی این روش، انحراف ولتاژ زیاد آن در شرایط بارگذاری کم است. زیرا همیشه بین منحنی افقی و غیرخطی، منحنی با ضریب افقی بزرگتر انتخاب می‌شود.

۳-۹-۲- روش‌های حذف اثر مقاومت خطوط

- روش جبران سازی مقاومت خط

مرجع [۳۷]، یک طرح کنترل محلی توزیع شده برای ریزشبهه‌ی DC پیشنهاد می‌دهد که محدودیت‌های کنترل افقی را از بین می‌برد. هنگامی که منابع تولید پراکنده از لحاظ جغرافیایی توزیع شده هستند، نمی‌توان مقاومت خطوط را نادیده گرفت. مقاومت خط باعث افزایش ضریب افقی و در نتیجه افزایش تنظیم ولتاژ می‌شود. همچنین، با توجه به تفاوت در مقاومت کابل‌های اتصال به باس DC، تقسیم بار مورد نظر قابل دستیابی نیست. بنابراین، اگر اثر مقاومت خط، توسط فیدبک مقاومت مجازی منفی از بین رود، ضریب افقی همانطور که در شکل (۲-۱۴) نشان داده شده است، به موقعیت اصلی مورد نظر خود بازگردانده می‌شود. بنابراین، تنظیم ولتاژ بهبود خواهد یافت و تقسیم جریان یکسان خواهد شد. این تکنیک کنترلی، به روش جبران سازی مقاومت خط موسوم است.

در این روش کنترلی، جریان خط، متغیر فیدبک است و ضریب افقی، برابر با مقاومت خط مربوطه در نظر گرفته می‌شود. مطلوب است که حداقل وابستگی بین مبدل‌ها برای دست یابی به تقسیم بار مناسب وجود داشته باشد. با استفاده از روش کنترلی ارائه شده در این مرجع، تقسیم جریان مستقل و صحیح و تنظیم ولتاژ بهبود یافته به طور همزمان قابل دستیابی خواهند بود.



شکل (۲-۱۴) مشخصه‌ی افقی برای مقاومت‌های خط متفاوت [۳۷].

مزیت عمده‌ی این روش کنترلی، عملکرد مستقل مبدل‌هاست که نیازی به کانال ارتباطی ندارند، بنابراین هزینه‌های سیستم کنترلی کاهش می‌یابد و پیاده‌سازی آن ساده‌تر می‌شود.

- روش تخمین امپدانس برای محاسبه‌ی ضرایب افتی

مرجع [۳۸]، یک روش کنترلی غیرمتمرکز برای محاسبه‌ی ضرایب افتی با تخمین مقدار مقاومت خط در ریزشکته‌های DC ولتاژ پایین پیشنهاد می‌دهد. این مرجع برای محاسبه‌ی مقاومت خطوط به منظور ارائه‌ی ضرایب افتی مناسب، از یک روش تخمین مقاومت خط با توجه به مرجع ولتاژ خروجی و ولتاژ و جریان خروجی مبدل استفاده می‌کند. سپس مقدار تخمین زده شده به عنوان یک پارامتر برای محاسبه‌ی ضرایب افتی هر مبدل سمت باتری به کار گرفته می‌شود. ضعف اصلی این روش، محاسبه‌ی ضرایب افتی به صورت نسبی است. یعنی چون نسبت ضرایب افتی با توجه به رابطه‌ی میان ضرایب افتی و مقاومت‌های خط با نسبت جریان‌ها تعیین می‌شود، برای محاسبه‌ی ضرایب افتی، از مقدار ضریب افتی در حالتی که جریان باتری در بیشترین مقدار خود قرار دارد استفاده می‌شود.

۲-۹-۴- روش‌های کنترلی نیمه متمرکز

- روش کنترل توزیع شده

مرجع [۳۹] به منظور بهبود عملکرد روش کنترل افتی متداول، یک کنترل کننده‌ی غیرمتمرکز جدید با استفاده از ارتباطات با پهنای باند کم پیشنهاد می‌کند که مزایای کلیدی آن قابلیت اطمینان قابل قبول، تنظیم ولتاژ کم و تقسیم جریان صحیح هستند. مشکل صحت تقسیم جریان را می‌توان با افزایش ضرایب افتی مرتفع کرد ولی از طرف دیگر تفاوت ولتاژ بی‌باری با ولتاژ بار کامل افزایش خواهد یافت. برای حل این مشکل، یک جمله‌ی تصحیح ولتاژ به مکانیزم کنترل افتی متداول اضافه می‌شود. میزان این جابجایی ولتاژ بستگی به کل بار سیستم دارد به طوری که با افزایش بار، مقدار جابجایی ولتاژ نیز، برای نزدیک کردن مرجع ولتاژ به ولتاژ نامی افزایش خواهد یافت. با این کار با وجود اینکه از ضریب افتی بزرگتری برای اطمینان از تقسیم جریان صحیح استفاده می‌شود، ولتاژ کار نزدیک به ولتاژ نامی باقی خواهد ماند.

هر کنترل کننده، مقدار پریونیت جریان عرضه شده توسط خود را با کنترل کننده‌های منابع دیگر به اشتراک می‌گذارد. هر کنترل کننده با استفاده از این اطلاعات، مقدار متوسط جریان عرضه شده توسط همه منابع را تعیین می‌کند.

جمله‌ی تصحیح ولتاژ با توجه به جریان متوسط محاسبه شده به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta V_i^0 = K_i i_{avg,i} i_{rated,i} \quad (21-2)$$

که K_i ، $i_{avg,i}$ و $i_{rated,i}$ ضریب تصحیح، جریان متوسط و جریان نامی منبع i ام هستند.

- روش کنترل توزیع شده‌ی بهبود یافته

مرجع [۴۰]، یک طرح کنترل توزیع شده‌ی بهبود یافته برای ریزشکبه‌های DC، با هدف غلبه بر نقایص روش کنترل افقی متداول پیشنهاد می‌کند. طرح کنترل ثانویه‌ی پیشنهادی می‌تواند انحراف ولتاژ DC ناشی از عملکرد افقی را حذف کند و صحت تقسیم جریان را با استفاده از به کارگیری همزمان جابجایی ولتاژ و تنظیم شیب افقی بهبود بخشد. در همین حال، مقدار متوسط ضرایب افقی محاسبه می‌شود و سپس توسط یک کنترل کننده‌ی اضافی در لایه‌ی کنترل ثانویه کنترل می‌شود تا از همگرا شدن ضرایب افقی به یک مقدار معقول اطمینان حاصل شود. از این رو، با تنظیم ضریب افقی، هر کدام از مبدل‌ها امیدانس خروجی برابر خواهند داشت و تقسیم مناسب جریان می‌تواند با وجود مقاومت‌های مختلف خطوط دست یافتنی شود.

- روش کنترل افقی اصلاح شده

در مرجع [۷]، یک کنترل کننده‌ی افقی اصلاح شده پیشنهاد می‌شود. این کنترل کننده برای اصلاح ولتاژهای اسمی، چنان که خطای بین آنها کاهش یابد، از جریان گردشی استفاده می‌شود. این کار موجب بهبود تقسیم جریان بین مبدل‌ها می‌گردد. مزیت روش پیشنهادی این است که تقسیم صحیح جریان، همزمان با تنظیم ولتاژ پایین حاصل می‌گردد.

برای دست یافتن به جریان گردشی صفر، ولتاژهای نامی باید برابر شوند. از آنجا که مبدل با جریان گردشی منفی، ولتاژ نامی کمتری دارد، کنترل کننده، ولتاژ نامی آن مبدل را افزایش می‌دهد. این در حالی است که ولتاژ نامی مبدل دارای جریان گردشی مثبت، بدون تغییر باقی می‌ماند.

به این ترتیب، هنگامی که مقدار ولتاژ نامی مبدل با جریان گردشی منفی، افزایش می‌یابد، مقدار جریان گردشی کاهش خواهد یافت. سپس برای تولید مرجع ولتاژ خروجی، ولتاژ نامی اصلاح شده در معادله‌ی اف‌تی قرار می‌گیرد.

به عنوان نقد می‌توان به این نکته اشاره کرد که روش فقط تنها به برابر کردن ولتاژهای نامی پرداخته و اثر مقاومت خطوط را نادیده گرفته است.

- روش کنترل اف‌تی اصلاح شده بر مبنای ارتباطات دارای پهنای باند کم

در مرجع [۲۱] به منظور بهتر شدن عملکرد ریزشکبه ی DC، یک روش کنترل اف‌تی اصلاح شده بر مبنای ارتباطات دارای پهنای باند کم پیشنهاد می‌شود. در این روش، کنترل کننده‌ی اف‌تی برای دستیابی به ولتاژ متوسط به کار برده می‌شود. همچنین برای بالا بردن همزمان صحت تقسیم جریان و بازیابی ولتاژ باس DC، از کنترل کننده‌های جریان در هر مبدل استفاده می‌شود. در این طرح برای انتقال ولتاژهای خروجی و جریان مبدل‌های مختلف، از سیستم LBC استفاده می‌شود. مکانیزم کنترل به این صورت است که هر کدام از ولتاژها و جریان‌های متوسط مبدل‌ها که توسط شبکه‌ی LBC بدست می‌آیند، به عنوان یک جمله‌ی تصحیح ولتاژ و جریان در مکانیزم کنترل اف‌تی به کار گرفته می‌شوند.

مشکل اصلی استفاده از این روش این است که اگر تعداد مبدل‌ها افزایش یابد، برای فرایند متوسط‌گیری، لازم است که تمام ولتاژها و جریان‌ها از طریق شبکه‌ی LBC به تمام مبدل‌ها منتقل شوند، که باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد.

- روش کنترل اف‌تی تطبیقی توزیع شده

در مرجع [۲] برای کنترل ریزشکبه‌های DC، یک مکانیزم اف‌تی تطبیقی توزیع شده پیشنهاد می‌شود. در این طرح، یک تنظیم کننده‌ی ولتاژ، نقطه‌ی معین ولتاژ را برای مکانیزم اف‌تی محلی تنظیم می‌کند. همچنین به منظور تنظیم مقدار ضریب اف‌تی متناسب با شرایط بارگذاری، یک تنظیم کننده‌ی جریان به سیستم اضافه می‌شود.

تنظیم کننده‌ی ولتاژ، برای برآورد ولتاژ متوسط در سرتاسر ریزشکبه از یک ناظر که داده‌های همسایه را پردازش می‌کند بهره می‌گیرد. به منظور تولید یک جمله‌ی تصحیح ولتاژ برای

تنظیم نقطه‌ی معین ولتاژ محلی، از همین برآورد استفاده می‌شود. تنظیم کننده‌ی جریان، جریان پریونیت هر مبدل را با جریان مبدل‌های همسایه در یک گراف ارتباطی مقایسه می‌کند و جمله‌ی تصحیح مقاومت ظاهری را برای تقسیم توان، متناسب با شرایط بارگذاری مختلف فراهم می‌کند. در صورت از مدار خارج شدن یک مبدل، ابتدا مبدل‌های همسایه، شیب خط و مرجع ولتاژ را تصحیح می‌کنند و سپس با تغییر ولتاژ و جریان این مبدل‌ها، مبدل‌های بعدی تغییرات را احساس کرده و جمله‌های تصحیح شیب و ولتاژ مرجع را تولید خواهند کرد. یعنی فرایند جبران تغییرات ناگهانی با ریتمی کند صورت می‌پذیرد که عیب اصلی این روش است.

- روش کنترل مشارکتی توزیع شده

مرجع [۴۱] یک روش توزیع شده برای کنترل ریزش شبکه‌های DC پیشنهاد می‌دهد. در این مرجع، به منظور تنظیم نقطه‌ی مرجع ولتاژ برای مکانیزم افقی محلی از یک تنظیم کننده‌ی ولتاژ و یک تنظیم کننده‌ی جریان استفاده می‌شود. در این روش از یک ناظر ولتاژ که در برابر نویز مقاوم است برای برآورد ولتاژ متوسط با استفاده از داده‌های مبدل‌های همسایه استفاده می‌شود. تنظیم کننده‌ی ولتاژ، این مقدار تخمین زده شده را پردازش می‌کند و یک جمله‌ی اصلاح ولتاژ برای تنظیم ولتاژ محلی تولید می‌کند. سپس تنظیم کننده‌ی جریان، جریان پریونیت هر واحد را با جریان واحدهای همسایه مقایسه می‌کند و جمله‌ی دوم اصلاح ولتاژ را برای ارائه‌ی تقسیم بار صحیح فراهم می‌کند. هر کنترل کننده تنها در یک گراف ارتباطی با مبدل‌های همسایه‌ی خود ارتباط برقرار می‌کند.

محدودیت روش فوق نیز، کند بودن روند جبران تغییرات توسط دیگر مبدل‌هاست. زیرا جمله‌های تصحیح ولتاژ به صورت ترتیبی ابتدا در مبدل‌های همسایه و بعد در مبدل‌های مرتبه‌ی بعدی همسایگی تولید می‌شوند.

- استراتژی کنترل تقسیم ولتاژ متوسط

مرجع [۴۲] یک استراتژی کنترل ولتاژ غیرمتمرکز مبتنی بر روش کنترل افقی پیشنهاد می‌کند. طرح کنترل ولتاژ پیشنهادی، از یک مکانیزم تقسیم ولتاژ متوسط برای جبران انحراف ولتاژ ناشی از کنترل افقی استفاده می‌کند. استراتژی کنترلی پیشنهاد شده می‌تواند با استفاده از

ارتباطات با پهنای باند کم، تنظیم ولتاژ را بهبود بخشد و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش دهد. در این روش، به منظور جبران افت ولتاژ ناشی از کنترل افقی، یک ترم تصحیح ولتاژ تولید می‌شود. حلقه‌ی کنترل پیشنهادی، در هر مبدل پیاده‌سازی شده و سپس خروجی کنترل‌کننده از طریق کانال ارتباطی با مبدل‌های دیگر به اشتراک گذاشته می‌شود. با دریافت تمام سیگنال‌های خروجی مبدل‌ها، ترم جبران ولتاژ محاسبه و به حلقه‌ی اصلی کنترل منتقل می‌شود. محدودیت اصلی روش پیشنهادی، کاهش قابلیت اطمینان سیستم همزمان با افزایش تعداد مبدل‌های سیستم است.

– جبران سازی کنترل افقی با استفاده از وضعیت بار مشترک

در مرجع [۲۰] به منظور جبران خطای افت ولتاژ و تقسیم بار، یک چارچوب جبران سازی یکپارچه با استفاده از وضعیت بار مشترک در کنترل‌کننده‌ی محلی پیشنهاد می‌شود. انحراف ولتاژ با یک کنترل‌کننده‌ی P^1 و تقسیم بار از طریق یک کنترل‌کننده‌ی PI^2 جبران می‌شوند. در این طرح، برای به اشتراک گذاری اطلاعات میان مبدل‌ها از ارتباطات با پهنای باند کم استفاده می‌شود. افت ولتاژ، از به کارگیری روش کنترل افقی منتج می‌شود در حالی که تقسیم نابرابر جریان بار، به دلیل وجود مقاومت‌های ظاهری نابرابر خطوط رخ می‌دهد. بنابراین، تنظیم ولتاژ و تقسیم جریان بار را می‌توان با توجه به علل بروزشان، با روش‌های متناظر جبران کرد. در این روش، یک خط ارتباطی برای تبادل وضعیت تقسیم بار به کار گرفته می‌شود. کنترل‌کننده‌ی محلی برای تولید وضعیت بار مشترک که به صورت متوسط جریان خروجی به شکل پریونیت معرفی می‌شود، جریان خروجی همه‌ی واحدها را دریافت می‌کنند. سپس برای جبران سازی ولتاژ، از ضرب یک ضریب جبران سازی در وضعیت بار مشترک استفاده می‌شود. ضریب جبران‌سازی برای بازیابی ولتاژ ریزشبه‌ها، برای همه‌ی واحدها یکسان انتخاب می‌شود. اما برای حفظ کنترل افقی و همچنین پایداری سیستم، باید کوچکتر از ضریب افقی انتخاب شود. جبران سازی خطای تقسیم جریان، در یک روش متفاوت با کمک ارتباطات دارای پهنای

^۱ Proportional controller

^۲ Proportional integral controller

باند کم ارائه می‌شود. برای مقایسه با جریان لحظه‌ای هر واحد، از وضعیت بار مشترک استفاده می‌شود. سپس، برای جبران سازی تقسیم جریان بار در هر کنترل کننده‌ی محلی، سیگنال خطا به یک کنترل کننده‌ی PI وارد می‌شود.

مزیت این روش این است که جبران سازی‌ها بدون نیاز به یک کنترل کننده‌ی مرکزی صورت می‌پذیرند. اما با افزایش تعداد مبدل‌ها و در نتیجه تعداد سیگنال‌های منتقل شده بین تمام مبدل‌ها، قابلیت اطمینان سیستم کاهش می‌یابد.

۲-۱۰- به کارگیری مکانیزم افتری در روشهای کنترل سلسله مراتبی

- کنترل سلسله مراتبی در ریزشبهه‌های DC

- مرجع [۳] به بیان روش کنترل سلسله مراتبی در ریزشبهه‌های DC می‌پردازد. این مرجع، این نوع از کنترل را به سه سطح کنترلی زیر مختلف تقسیم بندی می‌کند:
- کنترل اولیه: این سطح از کنترل، به تقسیم بار بین منابع تولید پراکنده می‌پردازد. در این قسمت می‌توان از روشهای تقسیم بار فعال، غیرفعال و روش‌های ترکیبی بهره گرفت که روش کنترل افتری نیز در همین سطح از کنترل پیاده سازی می‌شود.
 - کنترل ثانویه: این سطح از کنترل، مسئولیت تنظیم نوسانات ولتاژ را بر عهده دارد. همچنین مسئول همزمان سازی ریزشبهه با شبکه‌ی بالایی، برای اتصال به آن است.
 - کنترل سطح سوم: این بخش، جریان توان بین ریزشبهه و شبکه‌ی بالایی را تنظیم می‌کند. مدیریت انرژی و ارتباط با اپراتور سیستم نیز در حوزه‌ی وظایف این سطح از کنترل است.

- روش کنترل نظارتی بر ریزشبهه‌ی DC تنظیم شده با مکانیزم افتری تطبیقی

در مرجع [۸] برای غلبه بر چالش کنترلی مربوط به هماهنگی چند باتری در یک ریزشبهه‌ی DC جزیره‌ای، یک روش کنترل سلسله مراتبی دو سطحی ارائه می‌شود. سطح اولیه‌ی کنترل، شامل یک روش کنترل افتری تطبیقی به منظور تنظیم ولتاژ باس مشترک DC و حفظ وضعیت شارژ باتری‌ها نزدیک به یکدیگر طی مدیریت شارژ است.

در سطح دوم کنترل، یک لایه‌ی کنترل نظارتی به منظور استفاده از ارتباطات با پهنای باند

کم بین کنترل کننده‌ی مرکزی و مبدل‌ها طراحی شده است تا بتوان داده‌های مورد نیاز برای محاسبه‌ی مقادیر مقاومت مجازی تطبیقی و تغییر وضعیت عملکردی سیستم را منتقل کرد. کنترل اولیه، از دو حلقه‌ی کنترلی تو در تو تشکیل می‌شود که حلقه‌ی بیرونی مسئول ایجاد یک مرجع جریان و حلقه‌ی داخلی وظیفه‌ی نظارت و اطمینان از تعقیب این مرجع جریان توسط جریان خروجی را بر عهده دارد. بزرگترین ضعف روش پیشنهاد شده در این مرجع، استفاده از یک کنترل کننده‌ی مرکزی است که باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم و ایجاد نقطه‌ی شکست در سیستم می‌شود.

- کنترل توزیع شده و بهینه سازی در ریزشبهه‌ی DC

مرجع [۱۱]، برای تقسیم توان بین مبدل‌ها، یک استراتژی کنترل افتهی غیرمتمرکز ولتاژ را پیشنهاد می‌دهد. استراتژی پیشنهادی، توانایی دستیابی به یک تقسیم مناسب و پایدار بار را دارد. کنترل افتهی ولتاژ به صورت ذاتی باعث یک افت ولتاژ ماندگار^۱ در ریزشبهه می‌شود. به همین خاطر برای جبران این خطای حالت ماندگار، در این مرجع دو استراتژی کنترل ثانویه پیشنهاد می‌شود.

استراتژی اول، یک کنترل کننده‌ی انترگرال‌گیر کاملاً غیرمتمرکز است که افت ولتاژها را به خوبی جبران می‌کند ولی قادر نیست به یک تقسیم توان مناسب حالت ماندگار دست پیدا کند. استراتژی دوم پیشنهاد شده، یک فیلتر اجماع^۲ است که به ارتباط بین مبدل‌ها نیاز دارد. این استراتژی قادر به جبران انحرافات ولتاژ و دستیابی به یک تقسیم توان مناسب حالت ماندگار است. در این تحقیق بارها به صورت بارهای جریان ثابت در نظر گرفته می‌شوند.

- کنترل افتهی مشارکتی توزیع شده

مرجع [۴۳] یک کنترل کننده‌ی افتهی مشارکتی با تنها یک واحد تقسیم توان معرفی می‌کند. این کنترل کننده دارای دو سطح کنترلی است. سطح اول، یک کنترل افتهی ولتاژ برای تنظیم

^۱ Steady state

^۲ Consensus filter

ولتاژ خروجی مبدل با توجه به جریان خروجی آن است و سطح دوم، کنترل تقسیم توان با استفاده از تبادل جریان بین مبدل‌های همسایه با استفاده از ارتباطات با پهنای باند کم است.

۱۱-۲- بررسی پایداری سیستم‌های تحت کنترل افتی و ارائه‌ی راهکارهایی برای بهبود آن

- افزایش میرایی سیستم با استفاده از امپدانس مجازی وابسته به فرکانس

مرجع [۴۴] با استفاده از مدل سیگنال کوچک ریزشبهه‌ی DC و تحلیل مقادیر ویژه‌ی سیستم، پایداری سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای مختلف اعم از ضرایب افتی، پارامترهای خط و بار را بررسی می‌کند. نتایج بدست آمده از این تحلیل پایداری نشان می‌دهند که وجود مدارهای LC با میرایی ضعیف در ریزشبهه‌های DC، باعث بروز نوسانات فرکانس بالا می‌شود و میرایی سیستم را کاهش می‌دهد. این مرجع برای بهبود وضعیت میرایی و کاهش نوسانات فرکانس بالای سیستم، روش امپدانس مجازی وابسته به فرکانس را پیشنهاد می‌دهد.

در فرکانس‌های کم، مقدار امپدانس خروجی واحد کنترل ولتاژ، برابر با مقدار ضریب افتی روش کنترل افتی است ولی با افزایش فرکانس، میزان ظرفیت خازنی خروجی واحد کنترل ولتاژ بر روی مقدار امپدانس معادل تاثیر خواهد گذاشت. به طوری که افزایش مقدار ظرفیت خازنی خروجی واحد کنترلی موجب کاهش امپدانس خروجی واحد کنترل می‌شود. از آنجایی که مقدار ضریب افتی کوچک‌تر موجب پایداری بیشتر سیستم می‌شود، در روش پیشنهاد شده در این مرجع، از یک جبران کننده‌ی پایین گذر^۱ برای کاهش مقاومت مجازی در فرکانس‌های بالا و افزایش ظرفیت خازنی خروجی واحد کنترلی در محدوده‌ی فرکانس نوسانی استفاده می‌شود.

- افزایش پایداری سیستم با استفاده از امپدانس مجازی

در مرجع [۳۲] مسئله ناپایداری ناشی از بارهای توان ثابت با استفاده از شاخص تطبیق امپدانس نشان داده می‌شود. در همین حال، پایدارسازهای بر پایه‌ی امپدانس مجازی، به منظور افزایش میرایی ریزشبهه‌های DC با بارهای توان ثابت و تضمین عملکرد پایدار پیشنهاد می‌شوند.

^۱ Low pass compensator

- روش تقسیم جریان نوسانی

مرجع [۴۵] یک روش کنترل غیرمتمرکز برای تقسیم جریان مستقیم و جریان نوسانی بین واحدهای تولید پراکنده در ریزشبه‌های DC پیشنهاد می‌دهد. این طرح پیشنهادی شامل یک بلوک کنترل ولتاژ و یک بلوک کنترل جریان است که بلوک کنترل جریان آن شامل دو قسمت تقسیم جریان مستقیم و تقسیم جریان نوسانی است. اهداف اصلی روش پیشنهاد شده در این مرجع، تقسیم مناسب مولفه‌ی نوسانی جریان بار در خصوص ریزشبه‌های فرکانس بالاتر جریان در کنار تقسیم جریان بار DC است. اساس روش پیشنهاد شده در این مرجع، اختصاص ضریب افتی و امپدانس خروجی هر واحد تولید پراکنده به طور مناسب برای تقسیم مولفه‌های نوسانی و مستقیم جریان بار است.

واحد تقسیم جریان DC، شامل یک فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع 5 Hz به منظور حذف ریزشبه‌های فرکانس بالای جریان خروجی است. سپس جریان متوسط‌گیری شده برای محاسبه‌ی مرجع ولتاژ خروجی مبدل به مکانیزم افتی متداول اعمال می‌شود. سپس به منظور تقسیم مولفه‌ی نوسانی، جریان بار از یک فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع 1 KHz عبور داده می‌شود و پس از کسر متوسط جریان از آن، به یک تابع تبدیل مناسب اعمال می‌گردد. خروجی این بلوک، برای تصحیح مرجع ولتاژ بدست آمده در قسمت قبل به کار می‌رود [۴۵].

۲-۱۲- جمع بندی

در این فصل، روش‌های تقسیم توان در ریزشبه‌های DC و به طور ویژه روش کنترل افتی معرفی شدند و مروری بر کارهای انجام شده در این حوزه صورت گرفت. همچنین راهکارهای بهبود عملکرد روش کنترل افتی متداول بررسی شدند.

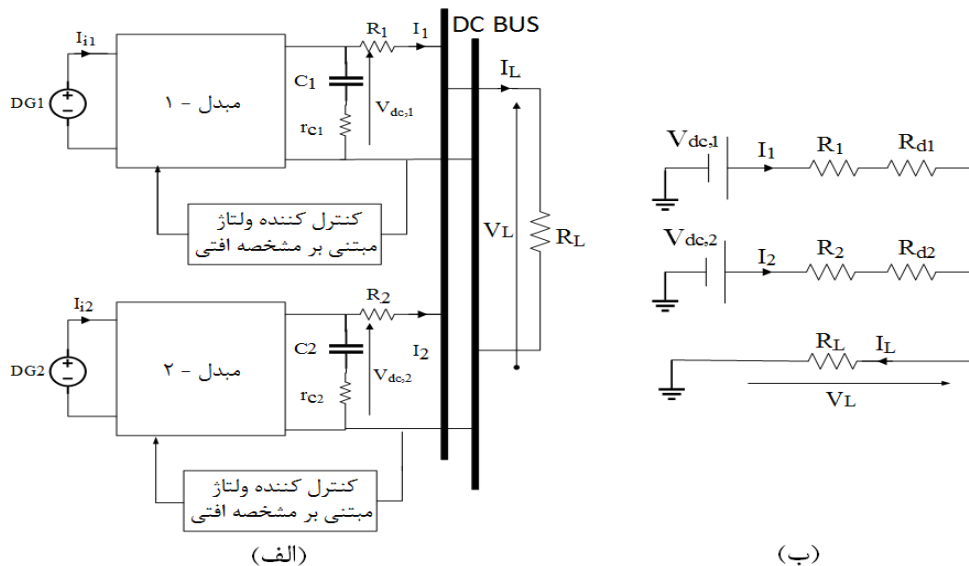
در فصل بعد، برای بهبود روش کنترل افتی متداول یک روش کنترل افتی تطبیقی با استفاده از ارتباطات با پهنای باند کم پیشنهاد می‌شود.

فصل ۳: روش کنترل افی تطبیقی برای تقسیم

بار در ریز شبکه های DC

۳-۱- مقدمه

همانطور که در بخش‌های قبل نیز بیان شد، یکی از راهکارهای مفید و پرکاربرد برای بهتر کردن عملکرد روش کنترل افی متداول در زمینه‌ی تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ، تعیین مقدار مناسبی برای ضرایب افی با توجه به شرایط و پارامترهای سیستم و میزان بارگذاری است. در این تحقیق، یک شاخص افی تطبیقی^۱ با در نظر گرفتن اثر تغییرات جریان بار، برای محاسبه‌ی مقدار مناسب ضرایب افی متناسب با شرایط بارگذاری معرفی می‌شود که منجر به حصول صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ قابل قبول به طور همزمان می‌گردد. این روش برای محاسبه‌ی مقدار ضریب افی بهینه، نیاز به وجود ارتباطات با پهنای باند کم برای انتقال سیگنال-های فیدبک ولتاژ و جریان بار دارد.



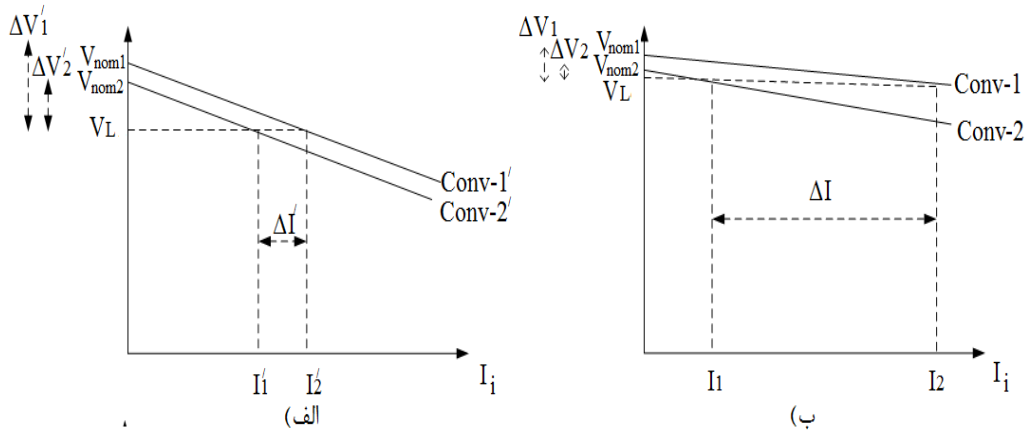
شکل (۳-۱) الف) ریزشبه‌ی DC با دو مبدل افزایشنده تحت کنترل افی (ب) مدار معادل حالت ماندگار سیستم.

در این قسمت ابتدا به بررسی دقیق عملکرد روش کنترل افی متداول به منظور ارائه‌ی پیشنهاداتی برای بهبود عملکرد آن می‌پردازیم. برای این منظور، یک ریزشبه‌ی جریان مستقیم شامل دو منبع DC یکسان، دو مبدل DC-DC با مشخصات و توان نامی یکسان تحت کنترل افی

^۱ Adaptive droop index

که توسط خطوط با مقاومت‌های نابرابر به یک باس DC متصل‌اند و یک بار مقاومتی به صورت نشان داده شده در شکل (۳-۱ الف) در نظر گرفته می‌شود.

ابتدا عملکرد سیستم فوق را از لحاظ تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ، برای مبدل‌های با ولتاژ مرجع و ضرایب افی نابرابر، مورد بررسی قرار می‌گیرد. میزان اختلاف جریان دو مبدل و مقدار انحراف ولتاژ باس DC از ولتاژ مرجع هر مبدل، در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲) تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ برای دو مبدل موازی با مشخصه‌های افی (الف) با ولتاژهای مرجع نابرابر و ضرایب افی یکسان (ب) با ولتاژهای مرجع نابرابر و ضرایب افی نابرابر.

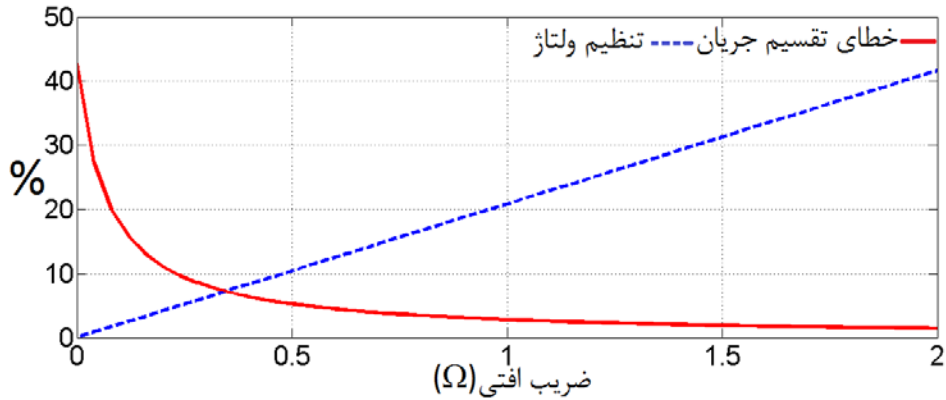
همانطور که در شکل (۳-۲ الف و ب) مشاهده می‌شود، با افزایش اختلاف ولتاژهای مرجع یا افزایش اختلاف ضرایب افی دو مبدل، صحت تقسیم جریان بار به خطر می‌افتد و میزان انحراف ولتاژ باس DC از مقدار ولتاژ مرجع هر مبدل نیز افزایش می‌یابد. در ادامه، اثر تغییرات ضرایب افی بر روی تنظیم ولتاژ، صحت تقسیم جریان، بازده سیستم و اثرات ناپایدار کننده‌ی بارهای توان ثابت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱-۲- تنظیم ولتاژ

می‌توان برای محاسبه‌ی تنظیم ولتاژ از معادله‌ی افی مطابق رابطه‌ی (۲-۴) نوشت:

$$V_{nom} - V_{dc} = R_d i \rightarrow \Delta v = \frac{R_d}{V_{nom}} i \quad (۱-۳)$$

نمودار نقطه چین در شکل (۳-۳) اثر افزایش ضریب افی بر روی تنظیم ولتاژ را نشان می-دهد. همانطور که مشاهده می شود، افزایش ضریب افی منجر به بدتر شدن تنظیم ولتاژ می شود. بنابراین ممکن است تنظیم ولتاژ، به ویژه برای شرایط بارگذاری زیاد مطلوب نباشد.



شکل (۳-۳) اثر افزایش ضریب افی بر روی تنظیم ولتاژ و تقسیم جریان [۴].

۳-۱-۳- صحت تقسیم جریان

اثر تغییرات ضریب افی بر روی خطای تقسیم جریان در شکل (۳-۳) به صورت خط ممتد نشان داده شده است. همانطور که می توان مشاهده کرد، صحت تقسیم جریان به شدت تحت تاثیر تغییرات ضریب افی است و با افزایش مقدار ضریب افی، خطای تقسیم جریان کاهش می یابد. با اعمال KVL در مدار شکل (۳-۱ الف) می توان نوشت:

$$-v_{dc,1} + (R_1 + R_{d1})I_1 = -v_{dc,2} + (R_2 + R_{d2})I_2 \quad (۲-۳)$$

که $v_{dc,i}$ ولتاژ خروجی، R_i مقاومت خط اتصال، R_{di} ضریب افی و I_i جریان خروجی مبدل i ام هستند. اگر $v_{dc,1} = v_{dc,2}$ باشد آنگاه می توان نوشت:

$$(R_1 + R_{d1})I_1 = (R_2 + R_{d2})I_2 \rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + R_{d2}}{R_1 + R_{d1}} \quad (۳-۳)$$

همانطور که می دانیم مقادیر ضریب افی نسبت به مقاومت های خطوط اتصال خیلی بزرگتر

هستند ($R_{d1} \gg R_1$ و $R_{d2} \gg R_2$). در حالی که $R_{d1} = R_{d2}$ باشد، با افزایش ضرایب افتری اثر مقاومت‌های خط و نقطه‌ی اتصال کاهش یافته و در نتیجه خطای تقسیم جریان کاهش می‌یابد.

۳-۱-۴- پایداری بارهای توان ثابت

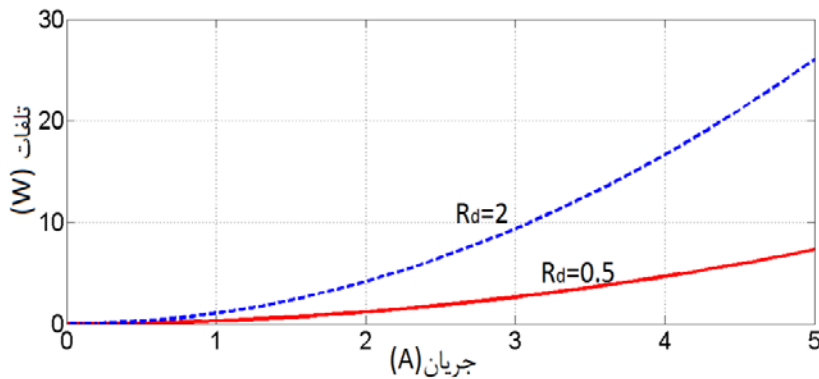
به دلیل مقاومت نموی منفی بارهای توان ثابت مطابق رابطه‌ی (۲-۱۶)، افزایش این بارها منجر به ناپایداری سیستم و ایجاد نوسان‌های شدید در ولتاژ خواهد شد. از آن جهت که ضریب افتری یک مقاومت مجازی را شبیه سازی می‌کند، افزایش آن، مقاومت مجازی بزرگتری را به سیستم اعمال می‌کند که منجر به کاهش اثر ناپایدار کننده‌ی بارهای توان ثابت خواهد شد.

۳-۱-۵- تلفات سیستم

تلفات کلی سیستم (P_{loss}) از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$P_{loss} = (R_1 + R_{d1})I_1^2 + (R_2 + R_{d2})I_2^2 \quad (۴-۳)$$

لذا تقسیم صحیح جریان که از ضرایب افتری بزرگ ناشی می‌شود، منجر به افزایش تلفات سیستم خواهد شد. شکل (۳-۴) کل تلفات سیستم را برای دو ضریب افتری متفاوت به ازای تغییرات جریان بار نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴) کل تلفات سیستم برای دو ضریب افتری مختلف به ازای تغییرات جریان [۴].

همانطور که می‌توان در شکل فوق مشاهده کرد، به ازای جریان بار یکسان، ضریب افی کمتر منجر به تلفات توان کمتر و در نتیجه بازده بیشتر سیستم می‌گردد. به طور خلاصه، از دیدگاه صحت تقسیم جریان و رفع ناپایداری ناشی از بارهای توان ثابت، مطلوب این است که ضرایب افی بزرگ باشند. اما از نظر تنظیم ولتاژ و بازده سیستم، ضرایب افی با مقادیر کمتر، مطلوبیت بیشتری دارند [4,10].

روابط زیر را می‌توان با نوشتن KVL در شکل (۳-۱) بدست آورد:

$$V_L = V_{nom} - i_1 \times R_{d1} - i_1 \times R_1 \quad (۵-۳)$$

$$V_L = V_{nom} - i_2 \times R_{d2} - i_2 \times R_2 \quad (۶-۳)$$

که می‌توان رابطه‌ی زیر را از آنها نتیجه گرفت:

$$\begin{aligned} \frac{i_1}{i_2} &= \frac{R_{d2} + R_2}{R_{d1} + R_1} \\ &= \frac{R_{d2}}{R_{d1}} + \frac{R_2 - R_{d2}/R_{d1} \times R_1}{R_{d1} + R_1} \end{aligned} \quad (۷-۳)$$

همانطور که در رابطه‌ی (۷-۳) نشان داده شده است، برای دستیابی به یک تقسیم جریان یکسان باید رابطه‌ی $R_{d1} + R_1 = R_{d2} + R_2$ برقرار باشد. از طرفی چون معمولاً مقدار ضرایب افی در مقایسه با مقاومت‌های خروجی مبدل‌ها مقادیر خیلی بیشتری دارند، می‌توان رابطه‌ی $(R_{d2} + R_2)/(R_{d1} + R_1)$ را تقریباً برابر با R_{d2}/R_{d1} در نظر گرفت. حال اگر برای مبدل‌ها از ضرایب افی یکسان استفاده شود، می‌توان به یک تقسیم جریان تقریباً برابر دست یافت.

لازم به ذکر است که در کل تحقیق انجام شده، برای سهولت در محاسبات، بدون اینکه از پیچیدگی مسئله کاسته شود، ضرایب افی مبدل‌ها با یکدیگر مساوی در نظر گرفته می‌شوند $(R_{d1} = R_{d2})$.

در ادامه با توجه به مطالب ارائه شده، روشی برای بهبود عملکرد روش کنترل افی متداول از نظر تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ پیشنهاد می‌شود.

۲-۳- روش کنترل افی تطبیقی

برای تعیین مقدار ضریب افی باید طوری عمل شود که مصالحه‌ای بین دقت تقسیم جریان و مقدار انحراف ولتاژ یا تلفات سیستم برقرار گردد. همچنین مطلوبست با افزایش جریان بار، مقدار ضریب افی معادل نیز افزایش یابد تا بتواند دقت تقسیم جریان را برای سیستم فراهم کند. برای این منظور، طی دو مرحله شاخصی به صورت زیر معرفی می‌گردد:

□ مرحله‌ی اول

در این مرحله، یک ساز و کار برای تعیین ضریب افی‌ای که به ازای آن صحت تقسیم جریان و تلفات، مقادیر قابل قبولی داشته باشند یا به عبارت دیگر مصالحه‌ای بین آنها به وجود آید، معرفی می‌شود. برای این منظور، یک شاخص به صورت تابعی از تلفات نرمالیزه شده‌ی توان خروجی و اختلاف جریان خروجی نرمالیزه شده‌ی مبدل، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$DI = \min \left[\left| \Delta I \right|_{N_i} + \Delta V_{N_v} \right] \quad (۸-۳)$$

که ΔI و ΔV به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Delta I = \frac{I_1 - I_2}{2} = \frac{I_L}{2} - I_i \quad (۹-۳)$$

$$\Delta V = V_{nom} - V_L = (R_i + R_{d,i}) \times I_i \quad (۱۰-۳)$$

این شاخص، مقدار کمینه‌ی مجموع انحراف ولتاژ نرمالیزه شده و مقدار نرمالیزه شده‌ی اختلاف جریان خروجی مبدل را در بازه‌ای مشخص تعیین می‌کند. N_v و N_i به ترتیب بیانگر ضرایب نرمالیزه کردن اختلاف جریان مبتنی بر جریان بار نامی و انحراف ولتاژ خروجی مبتنی بر ولتاژ نامی مبدل هستند.

برای محاسبه‌ی مقدار کمینه‌ی شاخص فوق و ضریب افی متناظر با آن، کافی است مقادیر I_1 و I_2 به صورت تابعی از مقدار ضریب افی یکی از کنترل کننده‌ها نوشته شوند. برای این منظور با اعمال KVL در مدار شکل (۳-۱ ب) می‌توان نوشت:

$$-v_{dc,1} + (R_1 + R_{d1})I_1 = -v_{dc,2} + (R_2 + R_{d2})I_2 \quad (11-3)$$

$$-v_{dc,2} + (R_2 + R_{d2})I_2 = (I_1 + I_2)R_L \quad (12-3)$$

حال با جایگذاری عبارت $(R_2 + R_{d2}) = m$ در رابطه‌ی (۱۲-۳) می‌توان نوشت:

$$I_1 = \frac{v_{dc,2} - mI_2 - R_L I_2}{R_L} \quad (13-3)$$

اگر $x = v_{dc,1}/v_{dc,2}$ و $y = R_1/R_2$ باشد و ضرایب افی دو مبدل با هم یکسان در نظر گرفته شوند از روابط (۱۱-۳) و (۱۳-۳) می‌توان نوشت:

$$-xv_{dc,2} + (yR_2 + R_{d2}) \left(\frac{v_{dc,2} - mI_2 - R_L I_2}{R_L} \right) = -v_{dc,2} + mI_2 \quad (14-3)$$

$$\rightarrow -xv_{dc,2} + (ym - (y-1)R_{d2}) \left(\frac{v_{dc,2} - mI_2 - R_L I_2}{R_L} \right) = -v_{dc,2} + mI_2$$

حال با استفاده از رابطه‌ی (۱۴-۳) می‌توان مقدار I_2 را به صورت زیر بدست آورد:

$$I_2 = \frac{(-xR_L + R_L + ym - (y-1)R_{d2})v_{dc,2}}{ym^2 + mR_L + ymR_L - (y-1)(mR_{d2} + R_{d2}R_L)} \quad (15-3)$$

سپس می‌توان مقدار I_1 را، از رابطه‌ی (۱۳-۳) بدست آورد:

$$I_1 = \frac{v_{dc,2}}{R_L} - \frac{m + R_L}{R_L} \times \frac{(-xR_L + R_L + ym - (y-1)R_{d2})v_{dc,2}}{ym^2 + mR_L + ymR_L - (y-1)(mR_{d2} + R_{d2}R_L)} \quad (16-3)$$

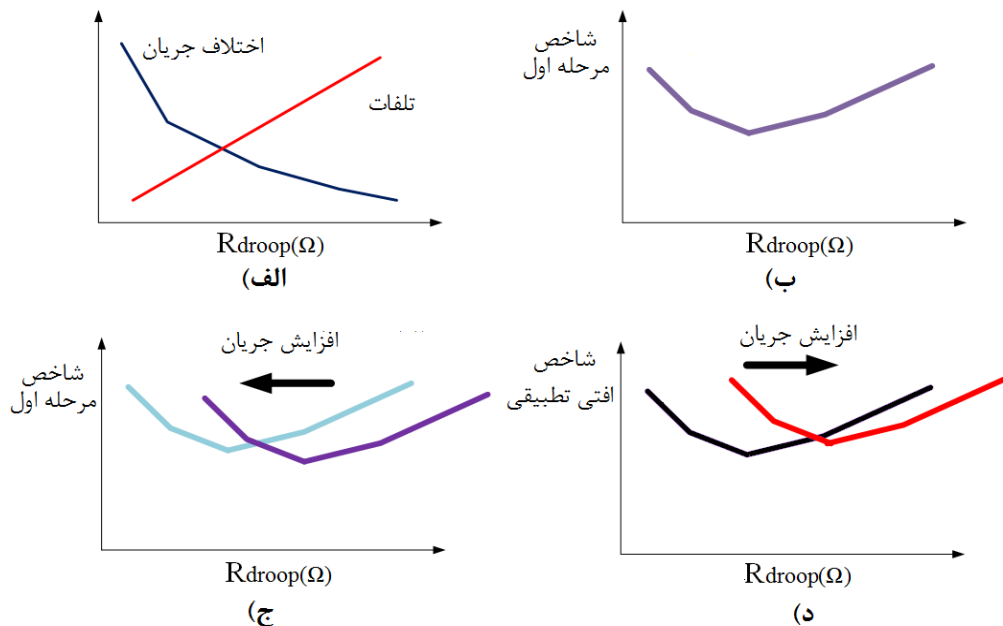
حال با جایگذاری روابط (۹-۳) و (۱۰-۳) با توجه به مقادیر محاسبه شده‌ی I_1 و I_2 ، در رابطه‌ی (۸-۳) می‌توان با محاسبه‌ی مقدار کمینه‌ی شاخص، ضریب افی‌ای را یافت که در آن تلفات و انحراف جریان مقادیر قابل قبولی داشته باشند.

برای مثال، رابطه‌ی بین اختلاف تقسیم جریان و تلفات، مطابق شکل (۳-۵ الف)، به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش R_d ، اختلاف تقسیم جریان کاهش و تلفات توان خروجی افزایش

می‌یابد. بنابراین، یافتن یک نقطه به صورت مشخص شده در شکل (۳-۵ ب) عملکرد بهتری را از نظر تقسیم جریان و تلفات به دنبال خواهد داشت.

با رسم شاخص به ازای تغییرات جریان، طبق آنچه در شکل (۳-۵ ج) نشان داده شده است، با افزایش جریان مبدل، ضریب افی متناظر با مقدار کمینه‌ی تابع کاهش می‌یابد. یعنی این ساز و کار برای جریان‌های بالاتر، ضریب افی کوچکتری را نتیجه خواهد داد.

همانطور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد، چون صحت تقسیم جریان در جریان‌های بالاتر اهمیت بیشتری دارد و با افزایش ضریب افی، مقدار صحت تقسیم جریان افزایش می‌یابد، نیاز است که ساز و کاری برای افزایش ضریب افی متناظر با افزایش جریان پیش بینی شود.



شکل (۳-۵) الف) اثر افزایش ضریب افی بر روی اختلاف جریان و تلفات مبدل‌ها (ب) شاخص مرحله‌ی اول (ج) اثر افزایش جریان بر روی شاخص مرحله‌ی اول (د) اثر افزایش جریان بر روی شاخص افی تطبیقی.

□ مرحله‌ی دوم

با توجه به آنچه در قسمت قبل گفته شد، برای تولید یک ضریب افی مناسب که علاوه بر ایجاد مصالحه بین صحت تقسیم جریان و تلفات سیستم، با افزایش جریان، صحت تقسیم جریان را افزایش دهد. برای این منظور، شاخص فوق را با ضرب جریان بار در اختلاف جریان نرمالیزه شده به صورت زیر اصلاح می‌کنیم:

$$ADI = \min \left[I_L \times \left| \Delta I \right|_{Ni} + \Delta V_{Nv} \right] \quad (17-3)$$

در این شاخص جریان بار به صورت یک ضریب برای وزندار کردن اختلاف تقسیم جریان به منظور افزایش ضریب افقی معادل به کار می‌رود. به اینصورت که با افزایش جریان بار، ضریب افقی معادل برای دستیابی به صحت تقسیم جریان مناسب افزایش می‌یابد. این شاخص، مقدار کمینه‌ی مجموع تلفات توان نرمالیزه شده و حاصلضرب جریان بار در مقدار نرمالیزه شده‌ی اختلاف جریان را در بازه‌ای مشخص تعیین می‌کند.

این روش به صورت آنالین با توجه به پارامترهای سیستم نظیر مقاومت‌های ظاهری خطوط و همچنین میزان بارگذاری سیستم، ضرایب افقی مبدل‌ها را به صورت لحظه‌ای محاسبه می‌کند. این شاخص برای محاسبه‌ی مقدار بار R_L ، نیاز به اندازه‌ی ولتاژ و جریان بار دارد. لذا نیاز است یک فیدبک از ولتاژ و جریان بار به هر کنترل کننده‌ی محلی در نظر گرفته شود تا بتوان میزان بار را به صورت لحظه‌ای محاسبه کرد و برای دستیابی به تنظیم ولتاژ و تقسیم جریان مناسب به ازای تغییرات بار، تغییرات لازم را در ضریب افقی کنترل کننده ایجاد نمود. لازم به ذکر است که در این روش نیازی به کنترل کننده‌ی مرکزی نیست و این روش کاملاً به صورت غیرمتمرکز پیاده سازی می‌شود و تنها به ارتباطات با پهنای باند کم برای انتقال فیدبک‌های ولتاژ و جریان بار به هر کنترل کننده‌ی محلی نیاز است که منافاتی با غیرمتمرکز بودن روش پیشنهاد شده ندارد.

برای محاسبه‌ی شاخص ADI، لازم است جریان هر مبدل به صورت تابعی از ضرایب افقی بدست آید. برای این منظور با فرض یکسان بودن ضرایب افقی دو مبدل، جریان مبدل‌ها از روابط (3-15) و (3-16) محاسبه می‌شوند. با جایگزینی مقادیر اندازه گیری شده‌ی ولتاژ و جریان بار در این روابط برای محاسبه‌ی R_L ، مقادیر I_1 و I_2 به صورت زیر به دست می‌آیند:

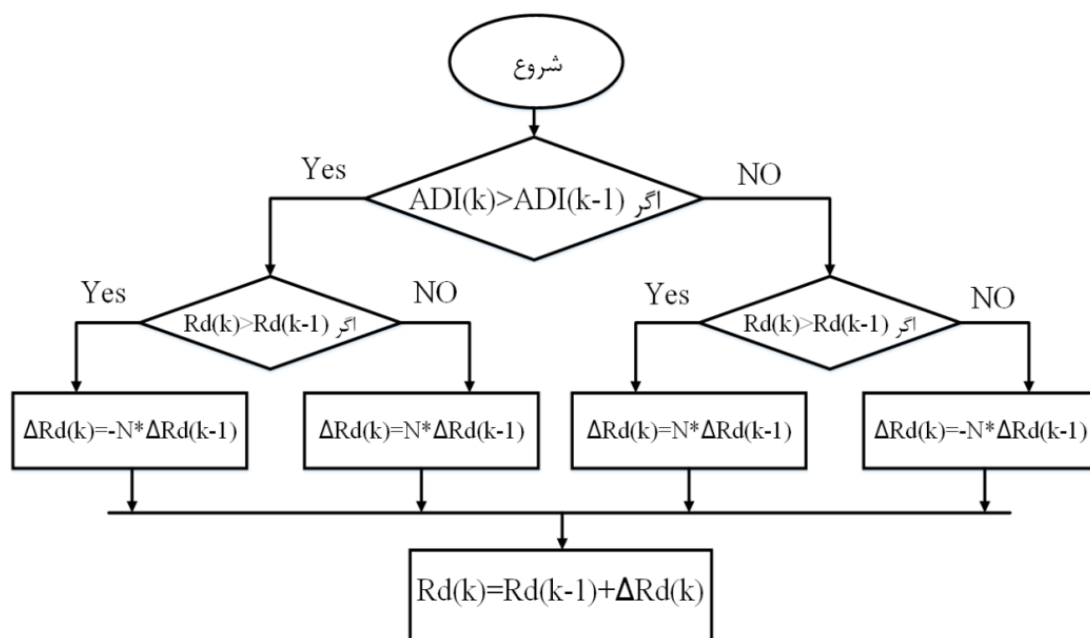
$$I_2 = \frac{(-x V_L / I_L + V_L / I_L + y m - (y - 1) R_{d2}) v_{dc2}}{y m^2 + m V_L / I_L + y m V_L / I_L - (y - 1) (m R_{d2} + R_{d2} V_L / I_L)} \quad (18-3)$$

$$I_1 = \frac{I_L v_{dc2}}{V_L} - \frac{I_L m + V_L}{V_L} \times \frac{(-x V_L + V_L + y m I_L - (y - 1) R_{d2} I_L) v_{dc2}}{y m^2 I_L + m V_L + y m V_L - (y - 1) (m R_{d2} I_L + R_{d2} V_L)} \quad (19-3)$$

که $y = R_1 / R_2$ و $x = V_{dc,1} / V_{dc,2}$ هستند.

با جایگذاری I_1 و I_2 در روابط (3-9) و (3-10)، شاخص ADI به صورت تابعی از ضرایب

افنی دو مبدل که در اینجا یکسان فرض شده اند بدست می‌آید. حال با به کارگیری الگوریتم آشوب و مشاهده^۱ (P&O) مقدار ضریب افنی متناظر با نقطه‌ی کمینه‌ی شاخص محاسبه می‌شود. سپس این مقدار، به عنوان ضریب افنی به مکانیزم افنی اعمال می‌شود. ساز و کار روش آشوب و مشاهده برای تعیین نقطه‌ی کمینه‌ی یک تابع، مبتنی بر ایجاد یک تغییر کوچک در متغیر سیستم و مشاهده و تحلیل نتایج است. به این صورت که اگر تغییر در جهت کاهش اندازه‌ی شاخص باشد، آنگاه متغیر در همین جهت تغییر می‌یابد و اگر اندازه‌ی شاخص افزایش یابد، تغییر در جهت عکس اعمال می‌شود [46]. فلوجارت این روش در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.



شکل (۳-۶) فلوجارت روش آشوب و مشاهده مورد استفاده برای محاسبه‌ی مقدار کمینه‌ی شاخص افنی تطبیقی

در این روش برای همگرا کردن سریع جواب، از یک ضریب تصحیح $N=0.1$ استفاده می‌شود. K شماره‌ی مرحله و $\Delta R_d(K)$ برابر با $R_d(K) - R_d(K-1)$ هستند. در ادامه به معرفی سیستم شبیه سازی شده پرداخته می‌شود و نحوه‌ی پیاده‌سازی روش - کنترلی پیشنهادی در نرم افزار سیمولینک / متلب معرفی می‌گردد. در سیستم شبیه سازی شده

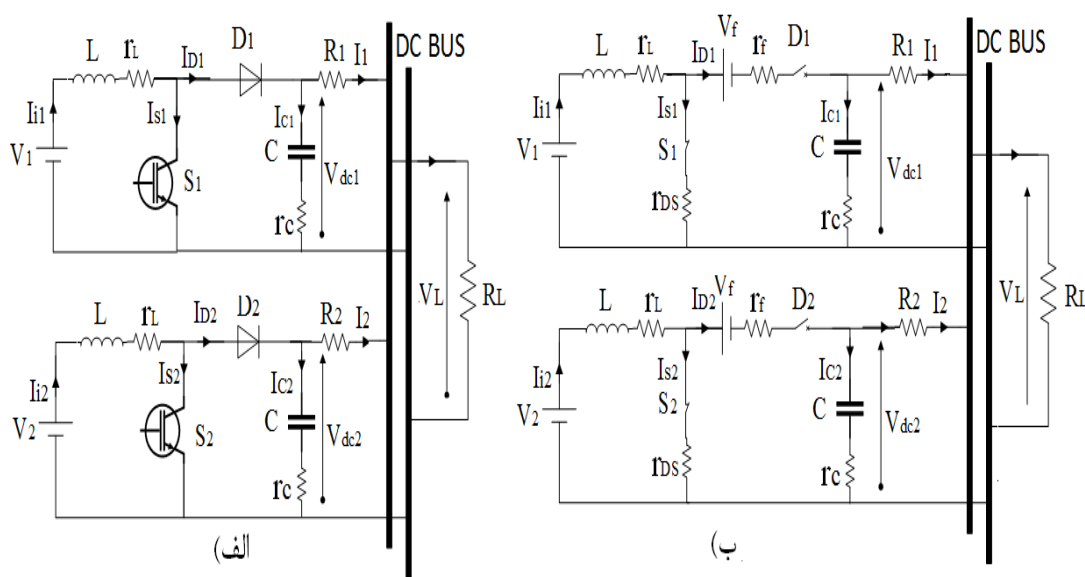
^۱ Perturb and observe

سعی بر آن شده که تا حد امکان وضعیت واقعی المان‌ها و نحوه اجرای برنامه‌های کنترلی در سیستم‌های واقعی، در نظر گرفته شود.

در بخش بعدی، نحوه پیاده‌سازی سخت‌افزاری روش کنترلی پیشنهادی در سیستم واقعی بیان می‌شود و به اجمال به معرفی نمونه‌ی ساخته شده، پرداخته می‌شود. همچنین فلوجارت برنامه‌ی نوشته شده در پردازنده‌ی سیگنال دیجیتال DSP مورد استفاده، بیان می‌شود. نهایتاً در بخش پایانی این فصل نتایج شبیه‌سازی و ساخت آورده می‌شوند و نتایج روش کنترل افی متداول با ضرایب افی مختلف و نتایج پیاده‌سازی روش کنترلی پیشنهادی با توجه به شرایط بارگذاری مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۳-۳- معرفی سیستم مورد آزمایش

به منظور بررسی مباحث تئوری ارائه شده در فصل قبل، یک ریزشبه‌ی DC شامل دو منبع ولتاژ DC یکسان، دو مبدل DC-DC افزاینده با مشخصات نامی مشابه و یک بار مقاومتی در نرم افزار سیمولینک / متلب شبیه‌سازی شده است. شکل (۳-۱) ساختار ریز شبکه‌ی DC مورد مطالعه و شکل (۳-۷) معادل مداری مبدل‌های آن را نمایش می‌دهند.



شکل (۳-۷) الف) عناصر مبدل‌های DC-DC افزاینده در سیستم مورد مطالعه ب) معادل مداری مبدل‌ها.

۴-۳- مشخصات سیستم تست

در این شبیه سازی ولتاژ DC ورودی مبدل برابر با ۲۴ V و مقدار ولتاژ مرجع اعمال شده به مکانیزم افی، برابر با ۳۶ V در نظر گرفته می شود. فرکانس کلیدزنی مبدل برابر با ۱ KHz انتخاب می شود. همچنین بار سیستم قابلیت تغییر پلهای بین مقادیر 50Ω ، 25Ω و 16.6Ω را دارد. با توجه به مشخصات ذکر شده ی سیستم و روابط بدست آمده از بخش ۲-۳ در خصوص محاسبه ی پارامترهای مبدل افزایشنده، می توان حداقل ظرفیت سلف و خازن مبدل را به ازای ریپل ولتاژ خروجی ۱٪ برای عملکرد در حالت جریان پیوسته به صورت زیر محاسبه کرد:

$$V_{in} = 24V \ \& \ V_o = 36V \ \& \ f = 10KHZ \ \& \ R = 16.6 - 50\Omega \ \& \ \Delta V_o / V_o = 0.1$$

$$V_o / V_{in} = 1 / (1 - D) \rightarrow D = 0.333$$

$$C_{min} = D / (R (\Delta V_o / V_o) f) = 666 \mu f$$

$$L_{min} = D (1 - D)^2 R / 2f = 185 \mu H$$

که V_o ، V_{in} ، f و R ولتاژ ورودی و خروجی، فرکانس کلید زنی و مقدار مقاومت بار خروجی مبدل هستند. مبنای محاسبه ی مقادیر سلف و خازن، روش استفاده شده در مرجع [۲۲] است. مشخصات سیستم تست شبیه سازی و پیاده سازی شده در جدول (۳-۱) آورده شده است.

جدول (۳-۱) مشخصات سیستم تست.

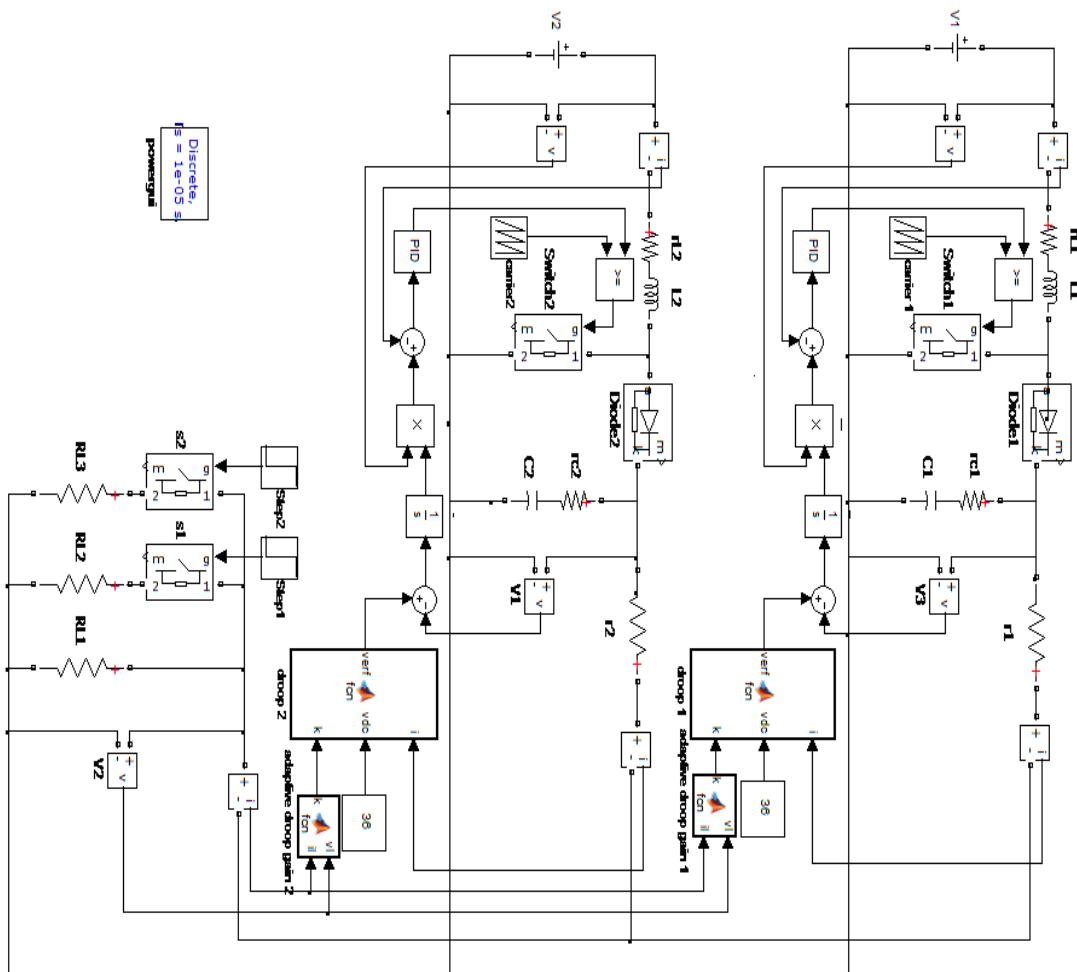
پارامتر	نماد	مقدار
ولتاژ ورودی مبدل	V_{in}	۲۰ V
ولتاژ خروجی مبدل	V_o	۳۶ V
فرکانس کلیدزنی نامی	f	۱۰ KHz
سلف مبدل	L	۷۵۰ μH
مقاومت داخلی سلف مبدل	r_L	۰/۶۸ Ω
خازن خروجی	C	۲۲۲۰ μF
مقاومت داخلی خازن خروجی	r_C	۰/۱۸ Ω
توان نامی مبدل	P	۳۰۰ W
مقاومت خط اتصال ۱	r_1	۰/۱ Ω
مقاومت خط اتصال ۲	r_2	۰/۱۳ Ω

لازم به ذکر است که برای مقایسه ی بهتر نتایج شبیه سازی با نتایج حاصل از نمونه ی آزمایشگاهی،

ابتدا مطالب لازم در مورد مشخصات شبیه سازی و نمونه‌ی واقعی بیان می‌شود و پس از آن نتایج شبیه سازی و داده‌های واقعی آورده می‌شوند.

۵-۳- شبیه سازی

در این تحقیق، برای شبیه سازی از نرم افزار سیمولینک / متلب نسخه 2012b استفاده شده است. پله‌های زمانی انجام شبیه‌سازی به میزان کافی کوچک انتخاب شده اند ($T_s=100ns$) تا خطاهای ناشی از محاسبات حداقل شوند. شماتیک کلی سیستم شبیه سازی شده تحت کنترل افی تطبیقی پیشنهادی در شکل (۸-۳) نشان داده شده است.



شکل (۸-۳) شماتیک کلی سیستم تست شبیه سازی شده تحت کنترل افی تطبیقی پیشنهادی.

در این شبیه سازی، کلیه دستورات کنترلی با استفاده از بلوک Embedded MATLAB Fuction که فضای کدنویسی با زبان C را فراهم می آورد پیاده سازی شده اند. مشخصات کلیدهای استفاده شده در سیستم تست، شامل IGBT و Diod در جدول (۲-۳) نشان داده شده اند. این پارامترها از مشخصات کلیدهای مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی گرفته شده اند.

جدول (۲-۳) مشخصات عناصر نیمه هادی مربوط به شبیه سازی در نرم افزار

المان	پارامتر	ولتاژ روشن بودن (V)	مقاومت سری (mΩ)	مقاومت موازی (kΩ)
دیود		۱/۵	۱	۱۰۰
IGBT		۲/۵	۱	۱۰۰

۳-۵-۲- معرفی ساز و کار کنترلی مبدل افزایشی

در این تحقیق، برای تولید یک ولتاژ معین و ثابت در خروجی یک مبدل افزایشی، از روش کنترل با جریان متوسط^۱ استفاده می شود. ساز و کار این روش شامل یک حلقه ی کنترل ولتاژ بیرونی برای جبران اختلاف ولتاژ خروجی مبدل و مقدار مرجع ولتاژ است. علاوه بر این، یک حلقه-ی کنترل جریان داخلی برای جبران اختلاف جریان ورودی و مقدار مرجع ساخته شده توسط ضرب مقدار ولتاژ ورودی مبدل در خروجی حلقه ی کنترل ولتاژ بیرونی در این ساز و کار تعبیه شده است. پس از آن، مرجع تولید شده توسط حلقه ی کنترل جریان داخلی از طریق یک ساز و کار PWM^۲، به سیگنال های کلیدزنی تبدیل می شود. دیاگرام کلی این روش کنترلی با توجه به مراجع [۲۲، ۴۷، ۴۸] در شکل (۳-۹) نشان داده شده است.

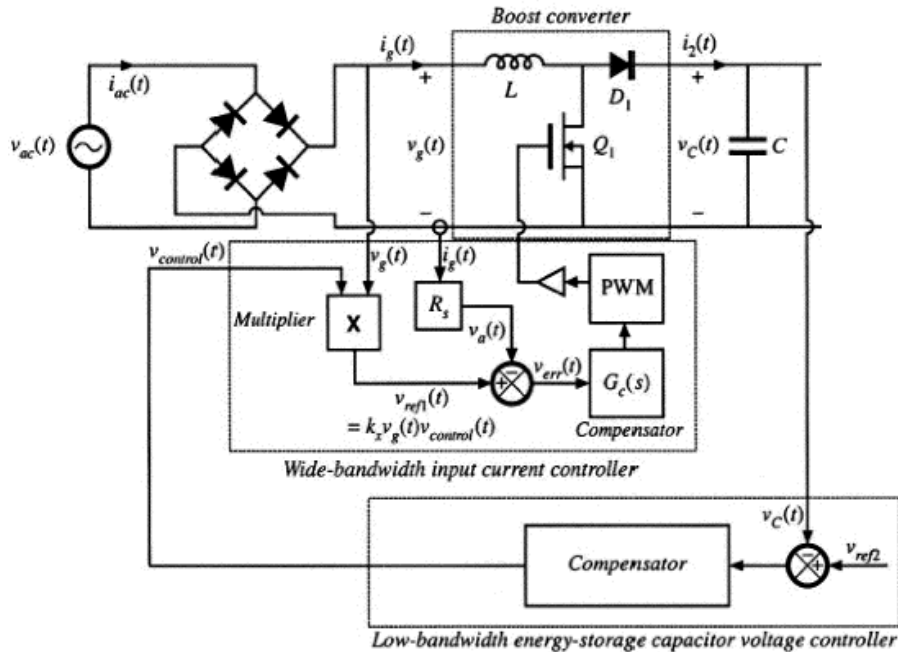
در شبیه سازی های ارائه شده، برای جبران سازی در حلقه ی کنترل ولتاژ بیرونی از یک بلوک انتگرال گیر و برای جبران سازی در حلقه ی کنترل جریان داخلی از یک بلوک جبران ساز PI استفاده می شود. ضرایب کنترلی این جبران سازها در جدول (۳-۳) نشان داده شده اند.

^۱ Pulse width modulation

^۲ Average current control

جدول (۳-۳) ضرایب کنترلی جبران سازها.

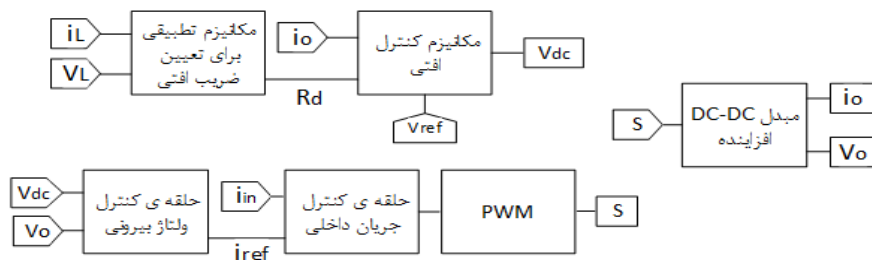
جبران ساز	ضریب	K_I	K_P
انتگرال گیر		۰/۱	۰
PI		۰/۲	۰/۰۸



شکل (۳-۹) مبدل افزایشدهی کنترل شده با جریان متوسط [۴۹].

۳-۵-۳- شبیه سازی روش کنترلی پیشنهادی

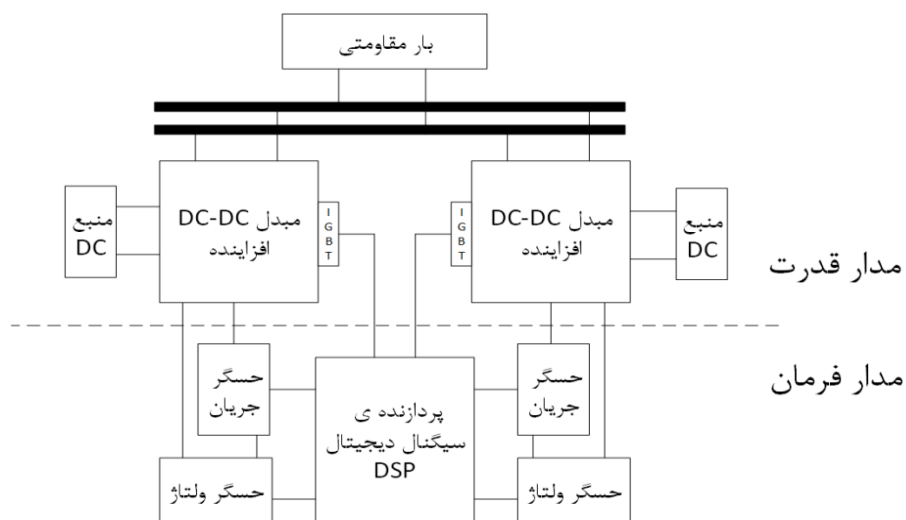
برای شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی ، سیگنال های ولتاژ و جریان بار به یک بلوک محاسباتی برای تعیین ضریب افی مناسب وارد می شوند. سپس، ضریب افی محاسبه شده بر اساس روابط بخش ۳-۲- به یک ساز و کار کنترل افی داده می شود. این ساز و کار با کاهش مرجع ولتاژ متناسب با میزان جریان خروجی مبدل و ضریب افی محاسبه شده، یک مرجع ولتاژ جدید برای تقسیم جریان صحیح بین مبدل ها تولید می کند. این مرجع ولتاژ جدید به منظور ردیابی توسط مبدل، به حلقه ی کنترل ولتاژ بیرونی که در قسمت قبل تشریح شد وارد می شود. نحوه ی پیاده سازی روش کنترل افی تطبیقی در محیط سیمولینک متلب در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۰) نحوه پیاده سازی روش کنترل افتری تطبیقی در محیط سیمولینک متلب.

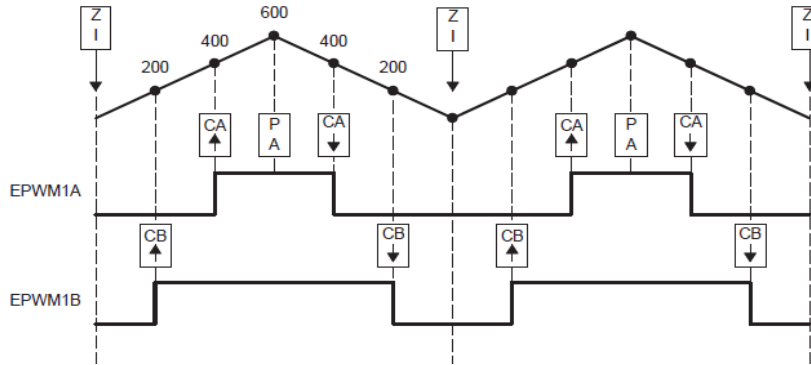
۳-۶- ساخت سخت افزار و پیاده سازی روش پیشنهادی بر روی یک نمونه آزمایشگاهی

برای پیاده سازی عملی روش پیشنهادی، از یک سیستم نمونه‌ی آزمایشگاهی شامل دو مبدل DC-DC افزایشنده، دو باتری به عنوان تغذیه‌ی DC مبدل‌ها، یک بار با قابلیت تغییرات پله‌ای و همچنین بردهای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان استفاده می‌شود. قسمت نرم‌افزاری این سیستم آزمایشگاهی، توسط یک پردازشگر سیگنال دیجیتال DSP/TMS320F28335 برنامه‌ریزی و کنترل می‌شود. همچنین از نرم‌افزار Code Composer Studio 6.0.1 برای برنامه‌نویسی در این پردازشگر استفاده می‌شود. مشخصات فنی DSP مورد استفاده در پیوست ۲ آورده شده است. شماتیک کلی سیستم نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل زیر نشان داده شده است.



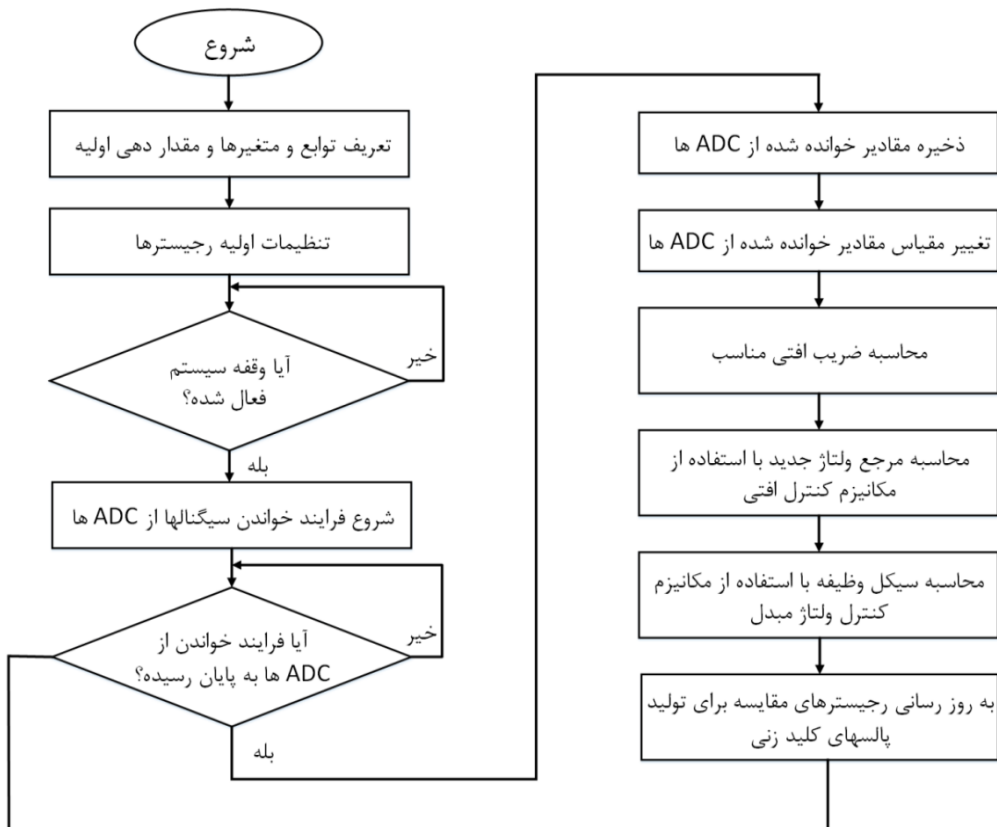
شکل (۳-۱۱) شماتیک کلی سیستم نمونه‌ی آزمایشگاهی.

شکل (۳-۱۲) شمای کلی فرایند تولید دو سیگنال PWM برای کنترل دو مبدل DC-DC افزاینده در پردازشگر مورد استفاده را نمایش می دهد [50].



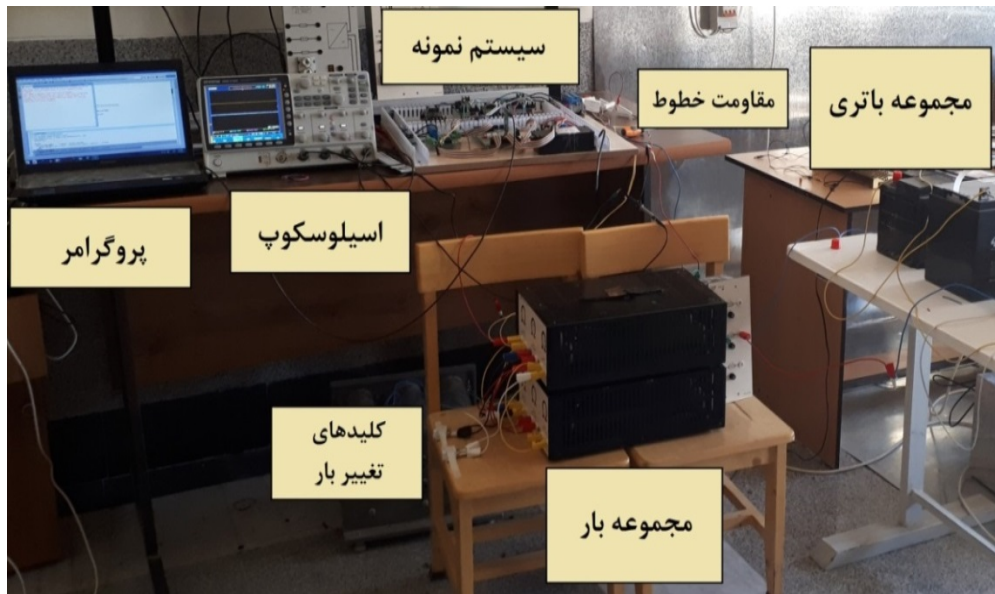
شکل (۳-۱۲) شمای کلی فرایند تولید دو سیگنال PWM برای کنترل دو مبدل DC-DC در پردازشگر DSP [۵۰].

فلوچارت برنامه‌ی پیاده سازی شده در پردازشگر DSP در شکل زیر نشان داده شده است:

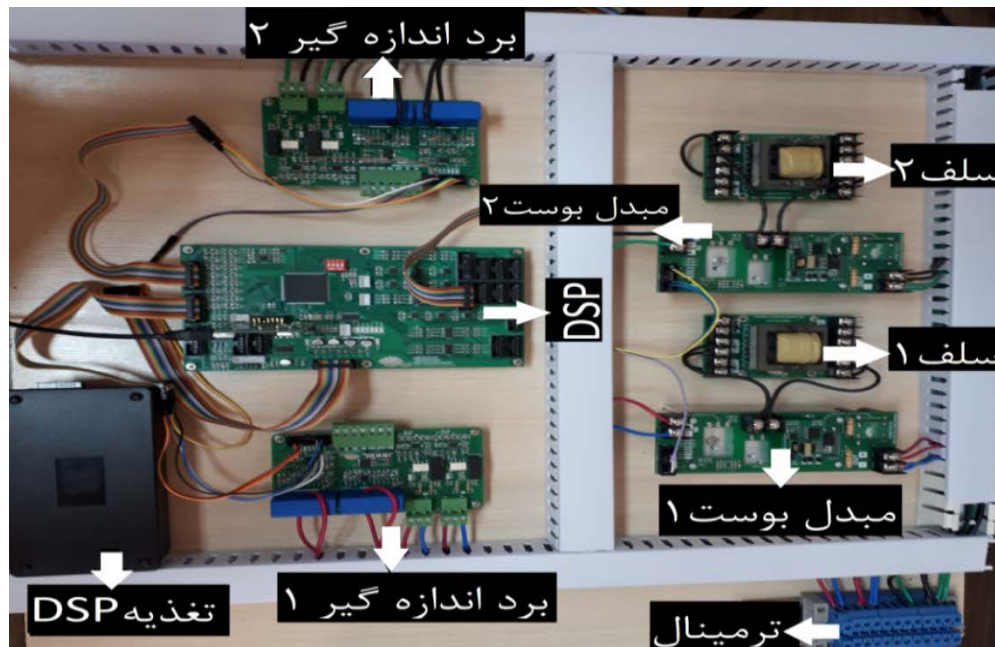


شکل (۳-۱۳) فلوچارت برنامه‌ی پیاده سازی شده در پردازشگر DSP.

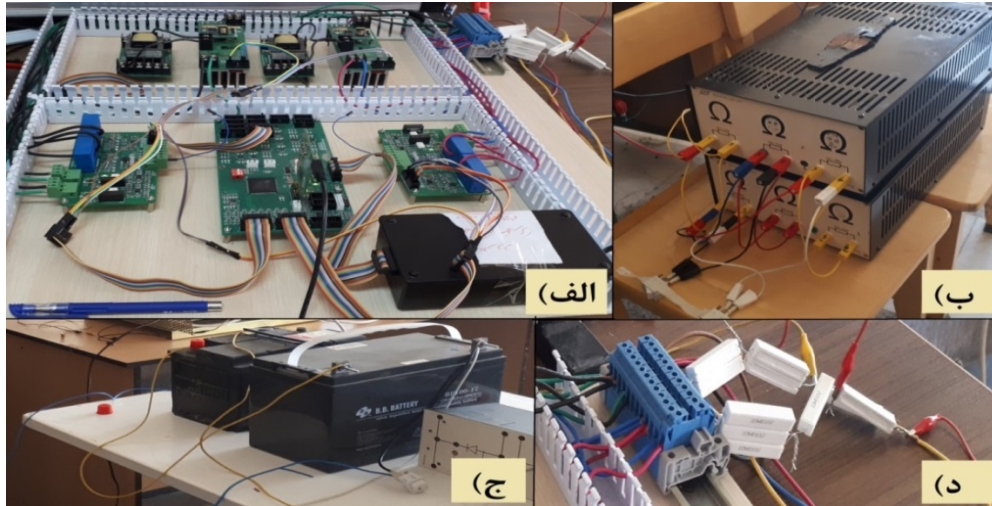
تصاویر مربوط به نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد تست، شامل مدارهای قدرت و فرمان، تغذیه، بار، سیستم‌های اندازه‌گیری، پروگرامینگ و مانیتورینگ در شکل (۳-۱۴) تا شکل (۳-۱۶) آورده شده‌اند.



شکل (۳-۱۴) سیستم نمونه‌ی آزمایشگاهی شامل تغذیه، بار، برد آزمایشگاهی، پروگرامر و اسیلوسکوپ



شکل (۳-۱۵) برد آزمایشگاهی پیاده سازی شده شامل دو قسمت مدار فرمان و مدار قدرت



شکل (۳-۱۶) الف) برد آزمایشگاهی (ب) مجموعه ی بار (ج) مجموعه ی باتری (د) مقاومت خطوط اتصال

۷-۳- نتایج شبیه سازی و ساخت نمونه ی آزمایشگاهی

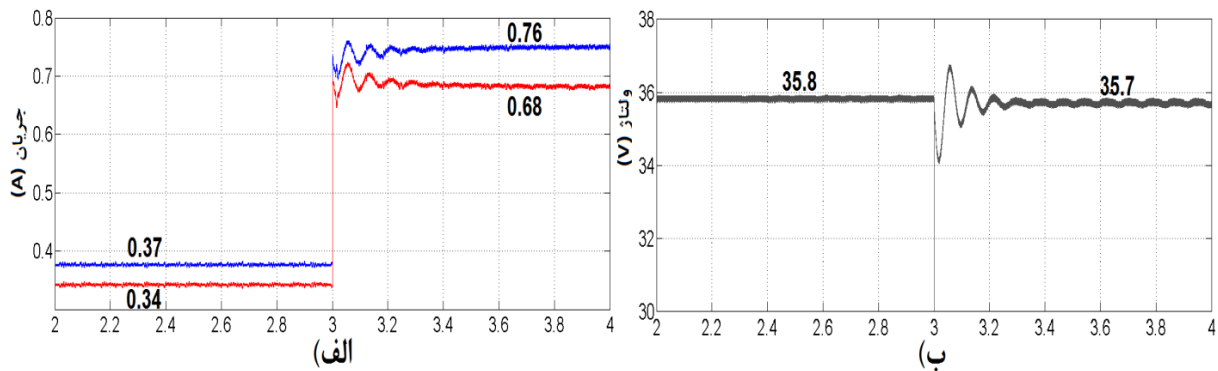
در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی عملی روش کنترل افی متداول و روش کنترل افی تطبیقی بر روی یک ریزشبه ی DC شامل دو مبدل DC-DC افزایشنده که به صورت موازی به یکدیگر متصل شده اند ارائه می گردد. در این بخش، دو سناریوی مختلف برای تقسیم توان شبیه سازی و پیاده سازی می شوند. این سناریوها برای بررسی عملکرد روش های مذکور در شرایط مختلف بارگذاری طراحی شده اند. در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی روش های مختلف با هم مقایسه می شوند. لازم به ذکر است نتایج آزمایشگاهی توسط اسیلوسکوپ مدل GW-INSTEK/GDS-3154 ثبت و ذخیره شده اند که در هنگام بیان نتایج، از این شکل های ذخیره شده استفاده می شود.

۷-۳-۱- نتایج شبیه سازی و ساخت روش کنترل افی متداول

□ بررسی نتایج شبیه سازی روش کنترل افی متداول با ضریب افی کوچک

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی برای اعمال ضریب افی کوچک $R_{d1} = R_{d2} = 0.2$ به ازای شرایط مختلف بارگذاری نمایش داده شده و مورد بررسی قرار می گیرد.

الف) کاهش ناگهانی مقاومت بار

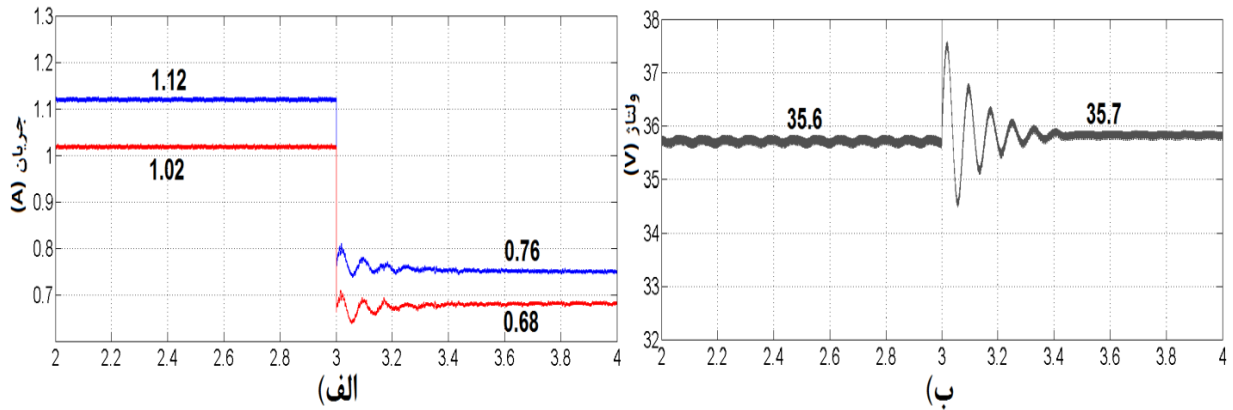


شکل (۳-۱۷) الف) جریان خروجی مبدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی متداول با ضریب افی کوچک $R_d = 0.2$ به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

همانطور که در شکل (۳-۱۷) نشان داده شده است، به ازای $R_L = 50\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۱۰٪ (شکل ۳-۱۷ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۰/۵٪ (شکل ۳-۱۷ ب) است. ولی از آنجا که در شرایط بارگذاری کم، جریان ها مقدار کمی دارند، این اختلاف جریان مشکلی برای سیستم ایجاد نمی کند. همچنین مشاهده می شود که با کاهش مقاومت بار و افزایش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم افزایش یافته و همچنین میزان اختلاف جریان دو مبدل نیز افزایش می یابد. با توجه به اینکه در این حالت ضریب افی استفاده شده در مکانیزم کنترلی کوچک است، میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم کم است ولی میزان افزایش اختلاف جریان مبدل ها با افزایش جریان بار زیاد است.

ب) افزایش ناگهانی مقاومت بار

مطابق آنچه در شکل (۳-۱۸) نشان داده شده است، به ازای $R_L = 16.6\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۱۰٪ (شکل ۳-۱۸ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۱/۲٪ (شکل ۳-۱۸ ب) است. این انحراف ولتاژ برای سیستم مطلوب است ولی با توجه به اینکه جریان مبدل ها نزدیک به حد بالای مجاز خود می باشند، این اختلاف جریان برای سیستم قابل قبول نیست. با افزایش مقاومت بار، میزان انحراف ولتاژ و همچنین میزان اختلاف جریان دو مبدل نیز کاهش می یابد. با توجه به اینکه در این حالت ضریب افی استفاده شده در مکانیزم کنترلی کوچک است، میزان کاهش انحراف ولتاژ سیستم کم است ولی میزان کاهش اختلاف جریان مبدل ها با کاهش جریان بار زیاد است.

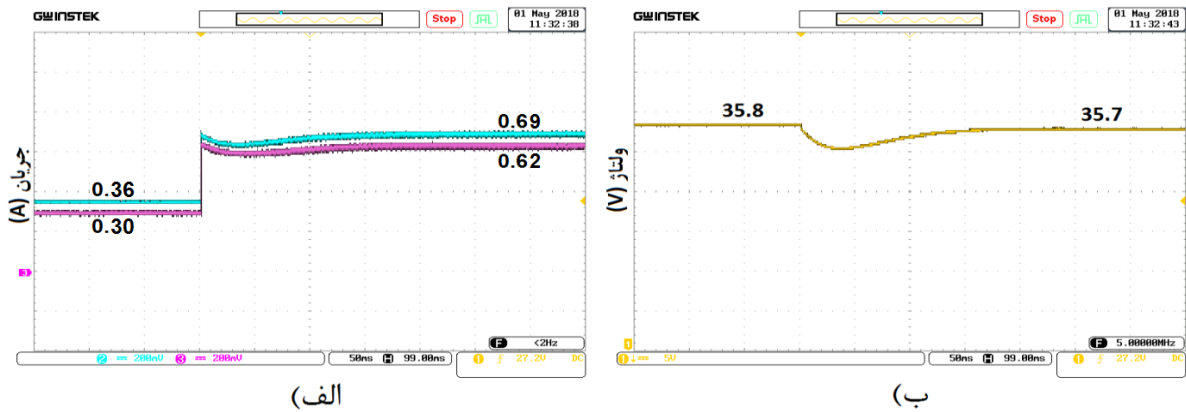


شکل (۳-۱۸) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه‌سازی روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری کوچک $R_d = 0.2$ به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

□ نتایج عملی پیاده‌سازی روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری کوچک

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری کوچک $R_{d1} = R_{d2} = 0.2$ بر روی نمونه‌ی آزمایشگاهی در شرایط مختلف بارگذاری نمایش داده می‌شود.

الف) کاهش ناگهانی مقاومت بار



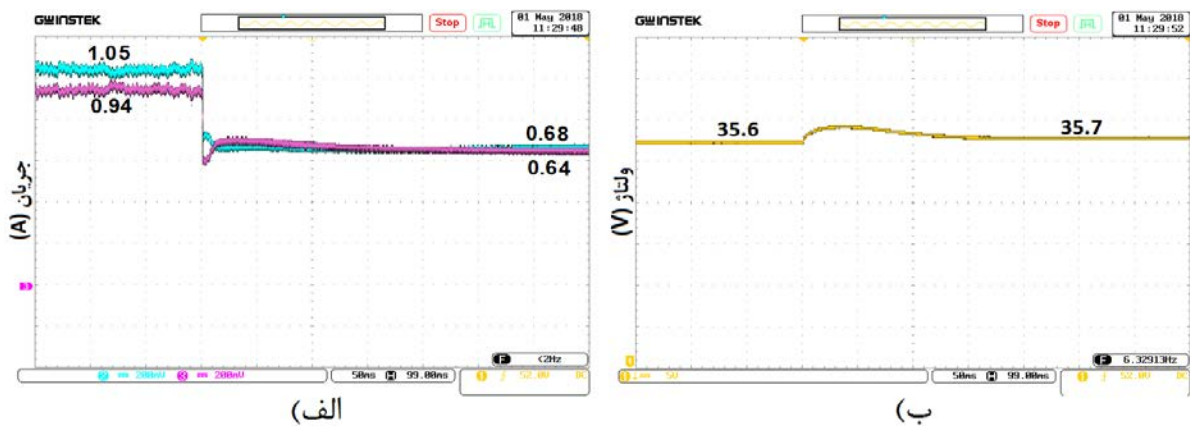
شکل (۳-۱۹) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده‌سازی عملی روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری کوچک $R_d = 0.2$ به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

شکل (۳-۱۹) نشان می‌دهد که به ازای $R_L = 50\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۱۰٪ (شکل ۳-۳) و انحراف ولتاژ حدوداً ۰/۵٪ (شکل ۳-۱۸) است. ولی از آنجا که در شرایط بارگذاری

کم، جریان‌ها مقدار کمی دارند، این اختلاف جریان مشکل زیادی برای سیستم ایجاد نمی‌کند. با افزایش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم افزایش یافته و همچنین میزان اختلاف جریان دو مبدل نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در این حالت ضریب افتی استفاده شده در مکانیزم کنترلی کوچک است، میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم کم است ولی میزان افزایش اختلاف جریان مبدل‌ها با افزایش جریان بار زیاد است.

(ب) افزایش ناگهانی مقاومت بار

همانطور که در شکل (۳-۲۰) نشان داده شده است، به ازای $R_L = 16.6\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۱۰٪ (شکل ۳-۲۰ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۱/۲٪ (شکل ۳-۲۰ ب) است با افزایش مقاومت بار و به تبع آن کاهش جریان بار، انحراف ولتاژ سیستم کاهش یافته و همچنین میزان اختلاف جریان دو مبدل نیز کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در این حالت ضریب افتی استفاده شده در مکانیزم کنترلی کوچک است، میزان کاهش انحراف ولتاژ سیستم کم است ولی میزان کاهش اختلاف جریان مبدل‌ها با کاهش جریان بار زیاد است.



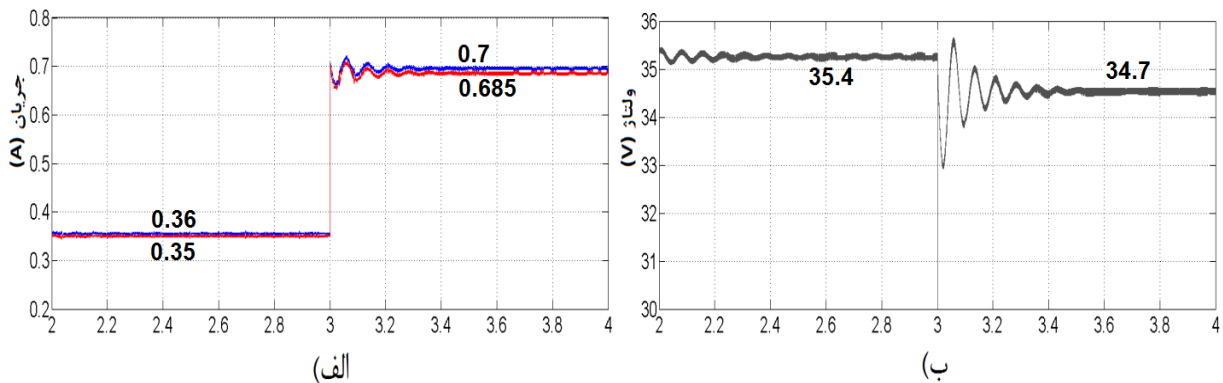
شکل (۳-۲۰) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده‌سازی عملی روش کنترل افتی متداول با ضریب افتی کوچک $R_d = 0.2$ به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

□ بررسی نتایج شبیه‌سازی روش کنترل افتی متداول با ضریب افتی بزرگ

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای اعمال ضریب افتی بزرگ $R_{d1} = R_{d2} = 2$

به ازای شرایط مختلف بارگذاری نمایش داده شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) کاهش ناگهانی مقاومت بار



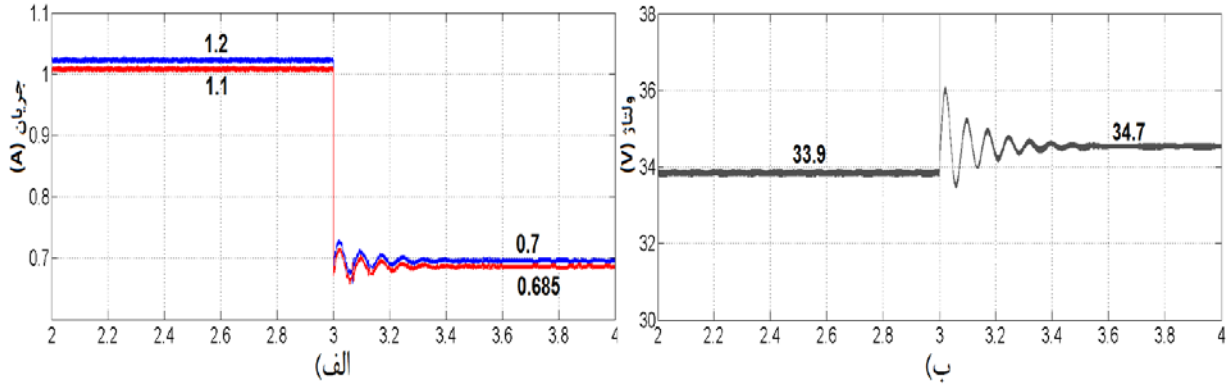
شکل (۳-۲۱) الف) جریان خروجی مبدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی متداول با ضریب افی بزرگ $R_d = 2$ به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

همانطور که در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده است، به ازای $R_L = 50\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۲٪ (شکل ۳-۲۱ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۱/۶٪ (شکل ۳-۲۱ ب) می‌باشند. از آنجایی که در شرایط بارگذاری کم، جریان‌ها مقدار کمی دارند، انحراف ولتاژ سیستم قابل قبول است. با کاهش مقاومت بار و افزایش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم افزایش یافته و همچنین میزان اختلاف جریان دو مبدل نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در این حالت ضریب افی استفاده شده در مکانیزم کنترلی بزرگ است، میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم زیاد است ولی میزان افزایش اختلاف جریان مبدل‌ها با افزایش جریان بار قابل قبول است. در این حالت با افزایش جریان بار، وضعیت تنظیم ولتاژ سیستم بدتر می‌شود.

ب) افزایش ناگهانی مقاومت بار

مطابق آنچه در شکل (۳-۲۲) نشان داده شده است، به ازای $R_L = 16.6\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۲٪ (شکل ۳-۲۲ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۶٪ (شکل ۳-۲۲ ب) است. این اختلاف جریان برای سیستم مناسب است ولی میزان انحراف ولتاژ در این حالت برای سیستم مطلوب نیست. با افزایش مقاومت بار و به تبع آن کاهش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم کاهش یافته و همچنین میزان اختلاف جریان دو مبدل نیز کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در این حالت ضریب افی استفاده شده در مکانیزم کنترلی بزرگ است، میزان کاهش انحراف ولتاژ سیستم زیاد

است ولی میزان کاهش اختلاف جریان مبدل‌ها با کاهش جریان بار کم است. در این حالت با کاهش جریان بار، وضعیت تنظیم ولتاژ سیستم بهبود می‌یابد.

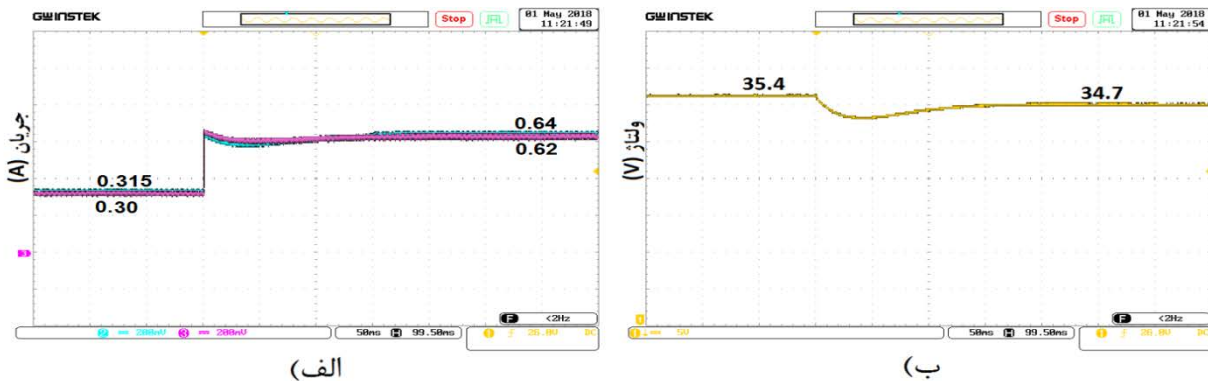


شکل (۳-۲۲) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری بزرگ $R_d = 2$ به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

□ بررسی نتایج عملی پیاده سازی روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری بزرگ

در این بخش نتایج حاصل از پیاده سازی روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری بزرگ $R_{d1} = R_{d2} = 2$ بر روی نمونه‌ی آزمایشگاهی در شرایط مختلف بارگذاری نمایش داده می‌شود.

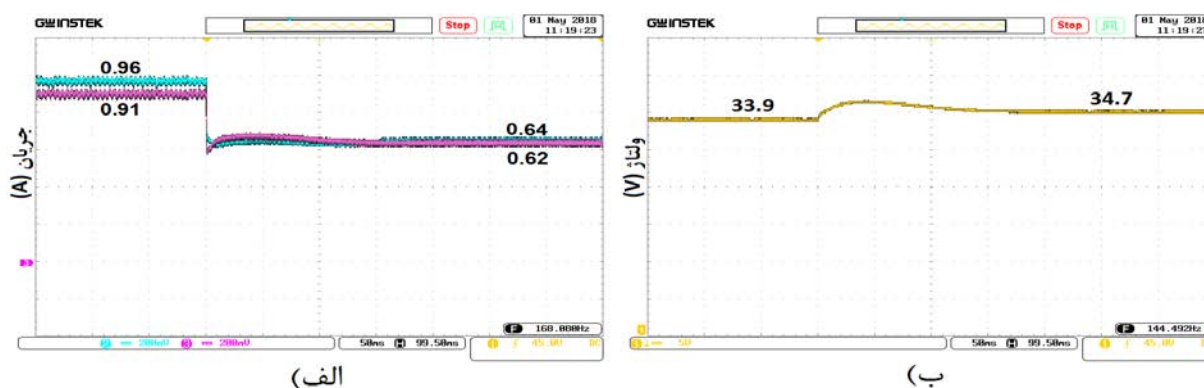
الف) کاهش ناگهانی مقاومت بار



شکل (۳-۲۳) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری بزرگ $R_d = 2$ به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

همانطور که در شکل (۳-۲۳) نشان داده شده است، به ازای $R_L = 50\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۲٪ (شکل ۳-۲۳ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۱/۶٪ (شکل ۳-۲۳ ب) می‌باشند. از آنجایی که در شرایط بارگذاری کم، جریان‌ها مقدار کمی دارند، انحراف ولتاژ سیستم قابل قبول است. با افزایش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم افزایش یافته و همچنین میزان اختلاف جریان دو مبدل نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در این حالت ضریب افتی استفاده شده در مکانیزم کنترلی بزرگ است، میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم زیاد است ولی میزان افزایش اختلاف جریان مبدل‌ها با افزایش جریان بار قابل قبول است. در این حالت با افزایش جریان بار، وضعیت تنظیم ولتاژ سیستم بدتر می‌شود.

ب) افزایش ناگهانی مقاومت بار



شکل (۳-۲۴) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده‌سازی عملی روش کنترل افتی متداول با ضریب افتی بزرگ $R_d = 2$ به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

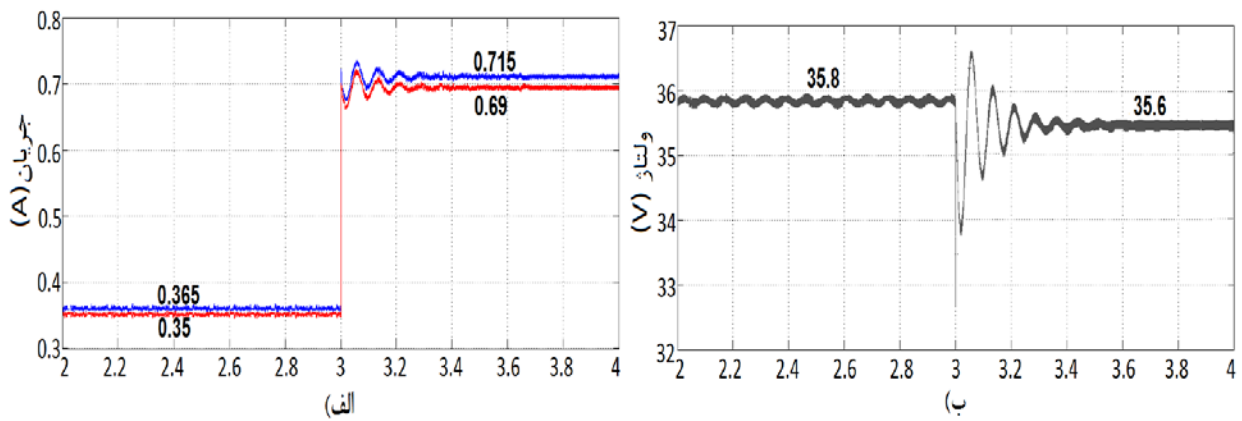
مطابق آنچه در شکل (۳-۲۴) نشان داده شده است، به ازای $R_L = 16.6\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۲٪ و انحراف ولتاژ حدوداً ۶٪ می‌باشند. این اختلاف جریان برای سیستم مناسب است ولی میزان انحراف ولتاژ در این حالت برای سیستم مطلوب نیست. در این حالت با کاهش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم کاهش یافته و همچنین میزان اختلاف جریان دو مبدل نیز کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در این حالت ضریب افتی استفاده شده در مکانیزم کنترلی بزرگ است، میزان کاهش انحراف ولتاژ سیستم زیاد است ولی میزان کاهش اختلاف جریان مبدل‌ها با کاهش جریان بار کم است. در این حالت با کاهش جریان بار، وضعیت تنظیم ولتاژ سیستم بهبود می‌یابد.

۳-۷-۲- نتایج حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی

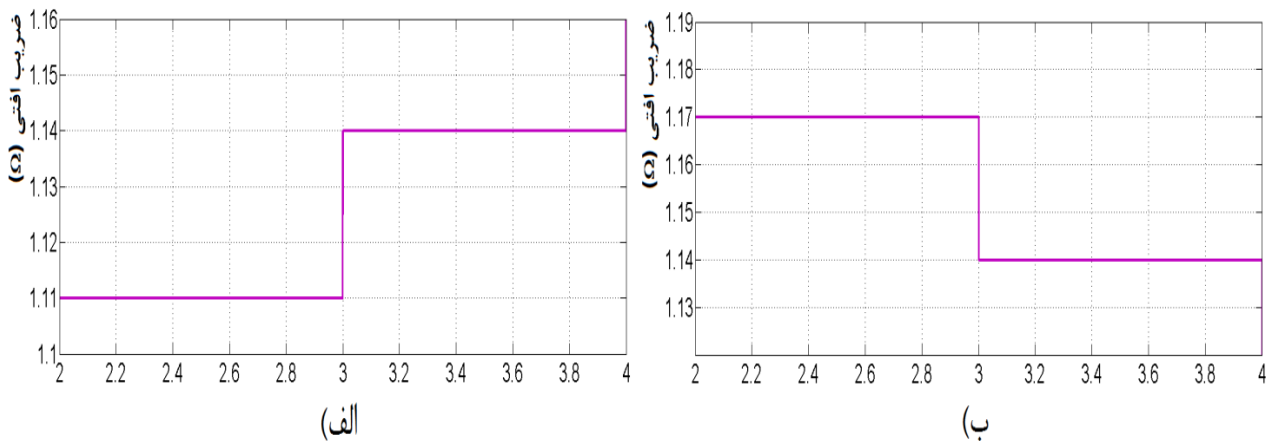
□ بررسی عملکرد روش کنترل افی تطبیقی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی به ازای شرایط مختلف بارگذاری نمایش داده شده و مورد بررسی قرار می گیرد.

الف) کاهش ناگهانی مقاومت بار



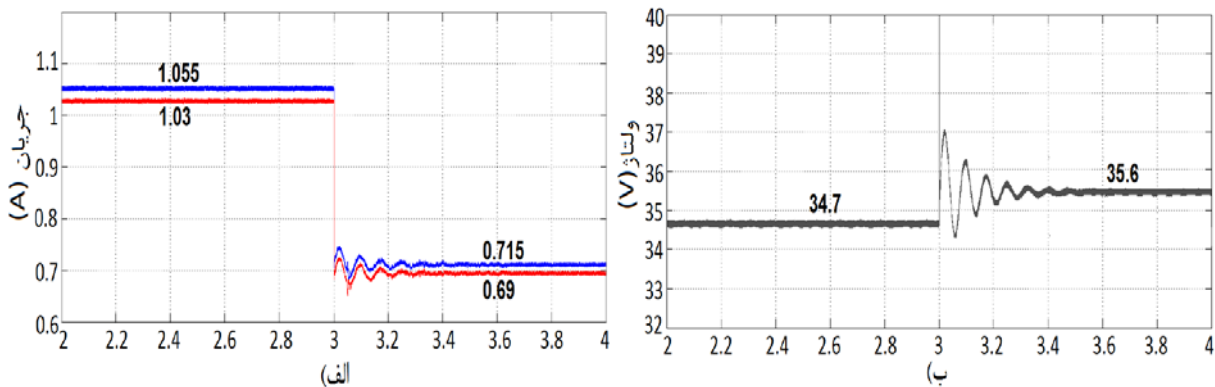
شکل (۳-۲۵) الف) جریان خروجی میدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$



شکل (۳-۲۶) الف) ضریب افی معادل حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ (ب) افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

همانطور که در شکل (۳-۲۵) قابل مشاهده است، به ازای $R_L = 50\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۳٪ (شکل ۳-۲۵ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۰/۶٪ (شکل ۳-۲۵ ب) می‌باشند. در این حالت با کاهش مقاومت بار و به تبع آن افزایش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم و میزان اختلاف جریان دو مبدل افزایش می‌یابند. همچنین شکل (۳-۲۶ الف) نشان می‌دهد که با افزایش جریان بار، ضریب افتی به کار گرفته شده برای مکانیزم افتی افزایش یافته است تا بتوان متناسب با شرایط بارگذاری به صحت تقسیم جریان مطلوبی دست پیدا کرد.

ب) افزایش ناگهانی مقاومت بار



شکل (۳-۲۷) الف) جریان خروجی مبدل‌ها ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افتی تطبیقی پیشنهادی به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

شکل (۳-۲۷) نشان می‌دهد که به ازای $R_L = 16.6\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۲/۵٪ (شکل ۳-۲۷ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۳/۵٪ (شکل ۳-۲۷ ب) می‌باشند. در این حالت نیز با افزایش مقاومت بار و به تبع آن کاهش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم و میزان اختلاف جریان دو مبدل کاهش می‌یابند. شکل (۳-۲۶ ب) نشان می‌دهد که با کاهش جریان بار، ضریب افتی معادل که به کنترل کننده‌ی افتی اعمال می‌شود برای دستیابی به صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ مناسب کاهش می‌یابد.

نتایج شبیه سازی، کارایی روش کنترل افتی تطبیقی پیشنهادی را نسبت به روش کنترل افتی متداول با ضریب افتی ثابت از نظر دستیابی به صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ قابل قبول تایید می‌کند.

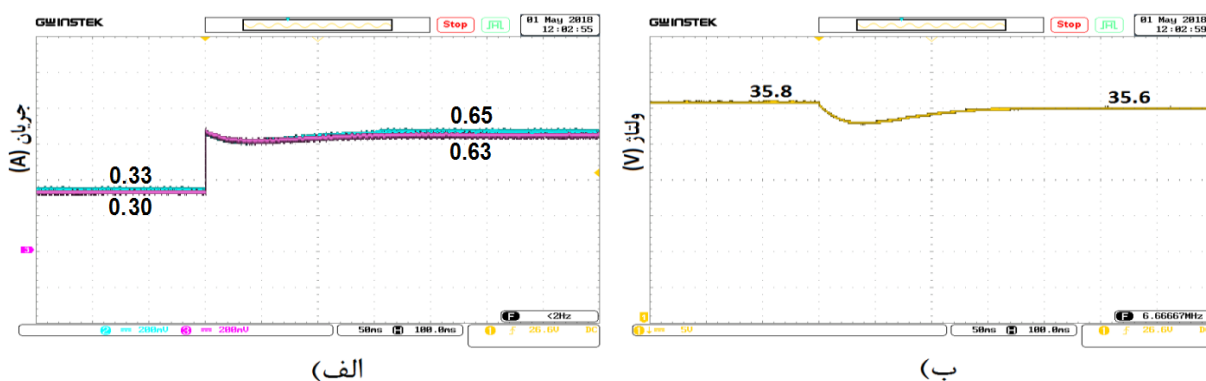
۳-۷-۳- بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی روش کنترل افی تطبیقی

□ بررسی عملکرد روش کنترل افی تطبیقی

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهاد شده بر روی سیستم نمونه‌ی آزمایشگاهی به ازای شرایط مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) کاهش ناگهانی مقاومت بار

همانطور که در شکل (۳-۲۸) نیز قابل مشاهده است، به ازای $R_L = 50\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۳٪ (شکل ۳-۲۸ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۰/۶٪ (شکل ۳-۲۸ ب) می‌باشند.

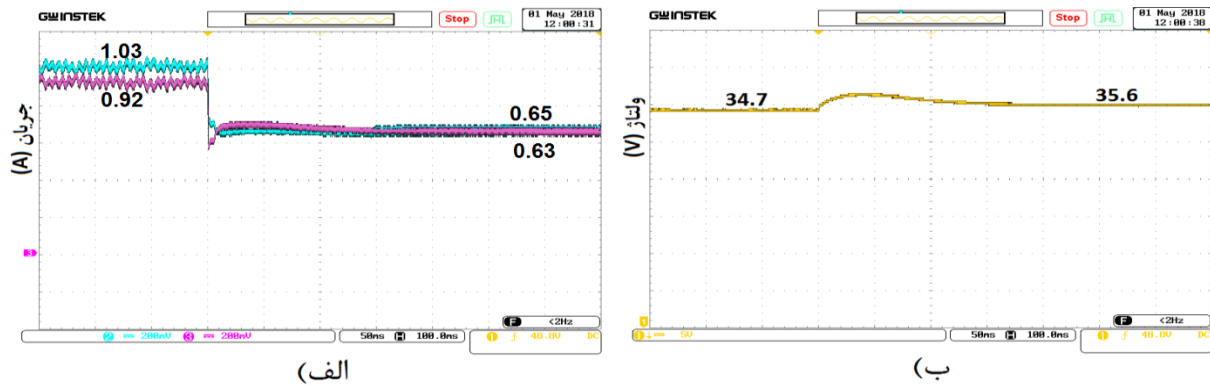


شکل (۳-۲۸) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده‌سازی عملی روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی به ازای کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

در این حالت نیز با افزایش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم و میزان اختلاف جریان دو مبدل افزایش می‌یابند. ولی میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم در این حالت نسبت به حالت استفاده از ضریب افی بزرگ کمتر است. همچنین میزان افزایش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب افی کوچک کاهش می‌یابد.

ب) افزایش ناگهانی مقاومت بار

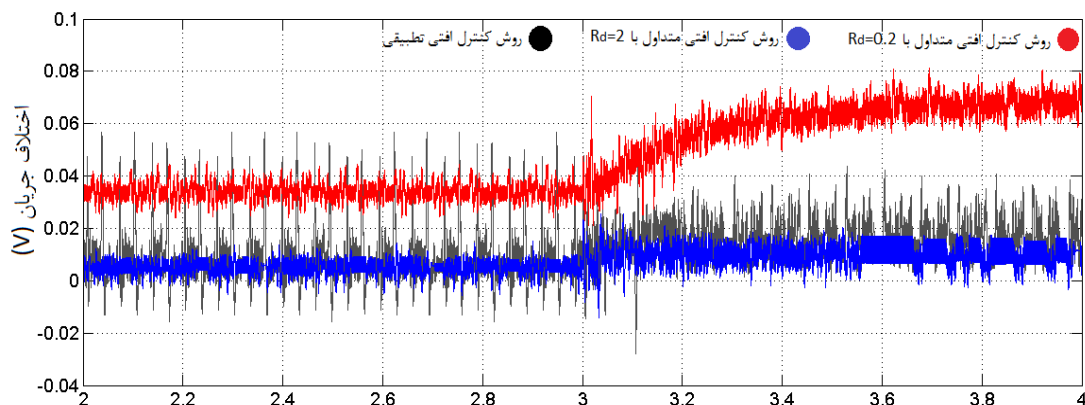
شکل (۳-۲۹) نشان می‌دهد که به ازای $R_L = 16.6\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۲/۵٪ (شکل ۳-۲۹ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۳/۵٪ (شکل ۳-۲۹ ب) می‌باشند. در این حالت نیز با کاهش جریان بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم و میزان اختلاف جریان دو مبدل کاهش می‌یابند.



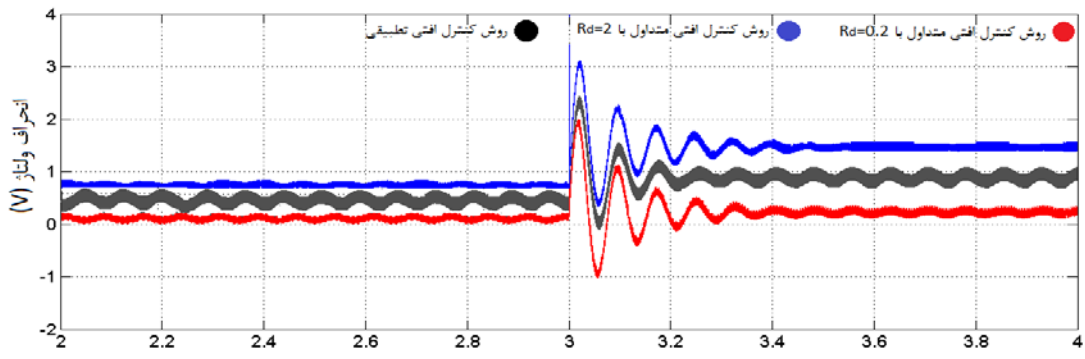
شکل (۳-۲۹) الف) جریان خروجی مبدل ها ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افتری تطبیقی پیشنهادی به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

۳-۷-۴- مقایسه‌ی نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی روش کنترل افتری تطبیقی با نتایج روش کنترل افتری متداول

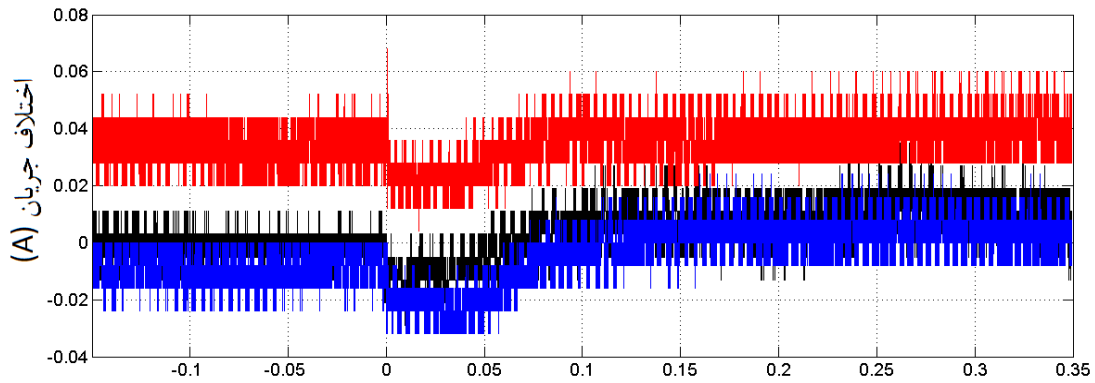
در این قسمت برای مقایسه‌ی بهتر عملکرد روش کنترل افتری متداول و روش کنترل افتری تطبیقی، مقدار اختلاف جریان مبدل‌ها و میزان انحراف ولتاژ باس DC از مرجع اولیه‌ی ولتاژ (مرجع ولتاژ اعمال شده به مکانیزم افتری) برای شبیه سازی و پیاده سازی هر کدام از روش‌های کنترل افتری متداول با ضریب افتری بزرگ، کوچک و روش کنترل افتری تطبیقی به ازای یک تغییر بار مشخص در یک نمودار رسم می‌شوند.



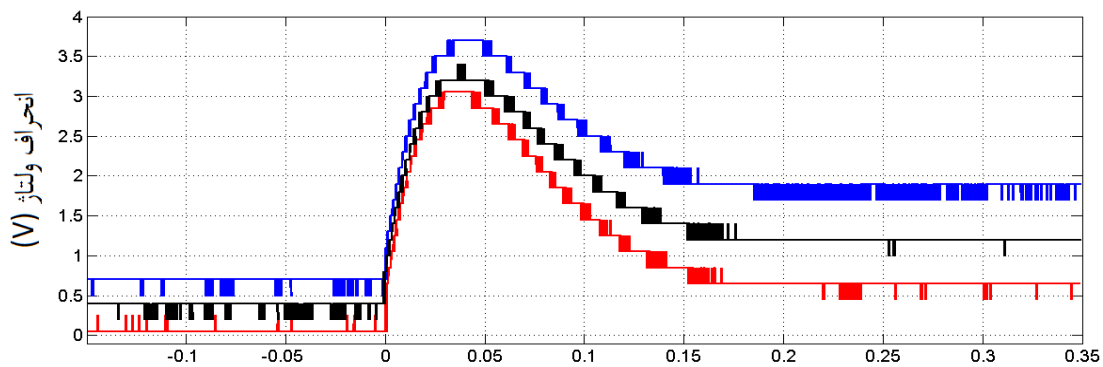
شکل (۳-۳۰) اختلاف جریان دو مبدل به ازای شبیه سازی روش‌های کنترل افتری متداول با ضرایب افتری کوچک و بزرگ و روش کنترل افتری تطبیقی



شکل (۳-۳۱) انحراف ولتاژ باس DC به ازای شبیه سازی روش های کنترل افتهی متداول با ضرایب افتهی کوچک و بزرگ و روش کنترل افتهی تطبیقی



شکل (۳-۳۲) اختلاف جریان دو مبدل به ازای شبیه سازی روش های کنترل افتهی متداول با ضرایب افتهی کوچک و بزرگ و روش کنترل افتهی تطبیقی



شکل (۳-۳۳) انحراف ولتاژ باس DC به ازای شبیه سازی روش های کنترل افتهی متداول با ضرایب افتهی کوچک و بزرگ و روش کنترل افتهی تطبیقی

با مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی عملی روش کنترل افی متداول و روش کنترل افی تطبیقی، می‌توان نکات زیر را بیان کرد:

۱- میزان انحراف ولتاژ باس مشترک DC، در روش پیشنهادی نسبت به روش کنترل افی با ضریب افی بزرگ بهبود یافته است.

۲-میزان اختلاف جریان دو مبدل در روش پیشنهادی نسبت به روش کنترل افی با ضریب افی کوچک کاهش یافته است.

۳- میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم در این حالت نسبت به حالت استفاده از ضریب افی بزرگ کمتر است. همچنین میزان افزایش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب افی کوچک کاهش می‌یابد.

۴- میزان کاهش انحراف ولتاژ سیستم در حالت اجرای روش پیشنهادی نسبت به حالت استفاده از ضریب افی بزرگ کمتر است. همچنین میزان کاهش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب افی کوچک نیز کاهش می‌یابد.

۵- مقدار ضریب افی اعمال شده به مکانیزم افی، با افزایش جریان بار افزایش و با کاهش جریان بار کاهش یافته است.

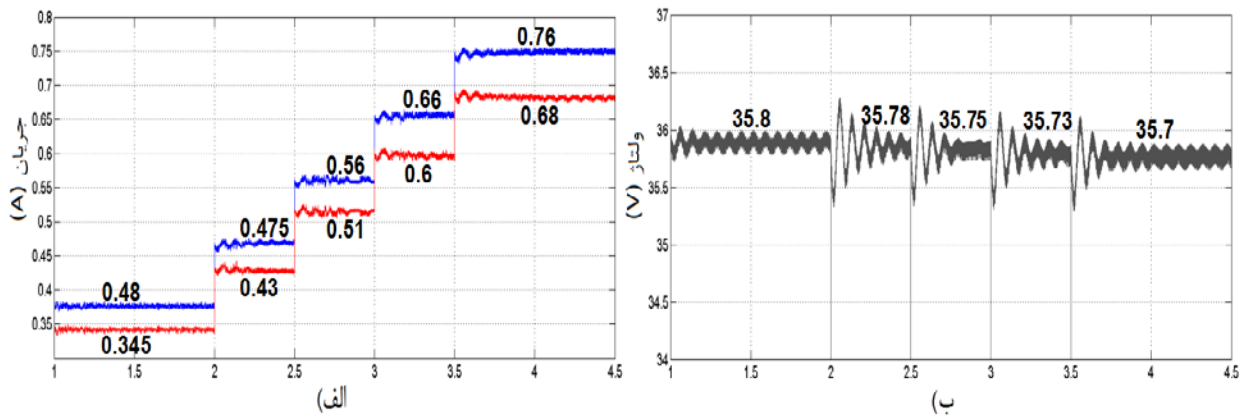
۵- روش پیشنهادی توانسته است بین صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ سیستم مصالحه-ی مناسبی ایجاد کند.

۳-۷-۵- شبیه سازی روش‌های مختلف برای اعمال تغییرات کوچک بار به صورت مرحله به مرحله

در این قسمت، کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ طی ۴ مرحله، با تغییرات کوچک به سیستم اعمال می‌شود.

□ روش کنترل افی متداول با ضریب افی کوچک

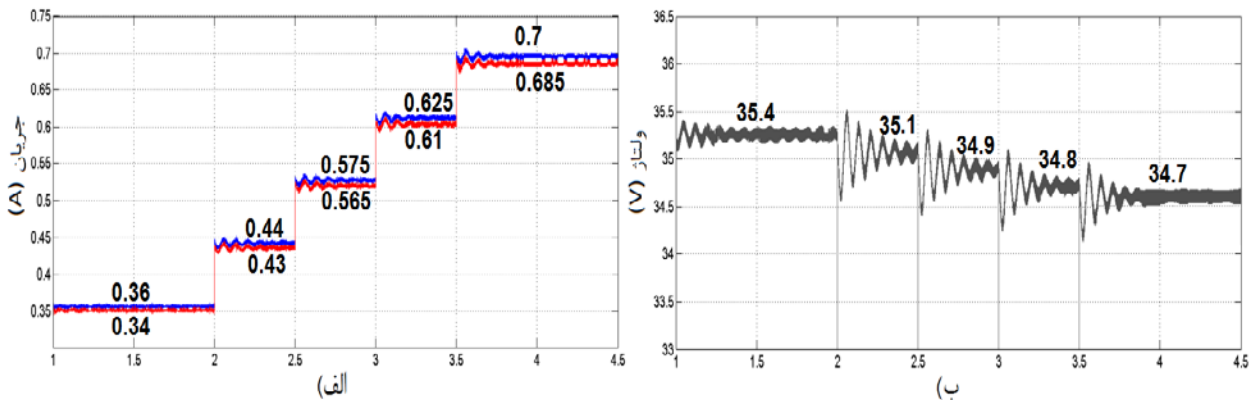
نتایج حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی متداول برای اعمال ضریب افی کوچک $R_{d1} = R_{d2} = 0.2$ به ازای افزایش ۲۵٪ جریان بار در ۴ مرحله به صورت زیر است:



شکل (۳-۳۴) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افقی متداول با ضریب افقی کوچک $R_d = 0.2$ به ازای تغییرات کوچک مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

□ روش کنترل افقی متداول با ضریب افقی بزرگ

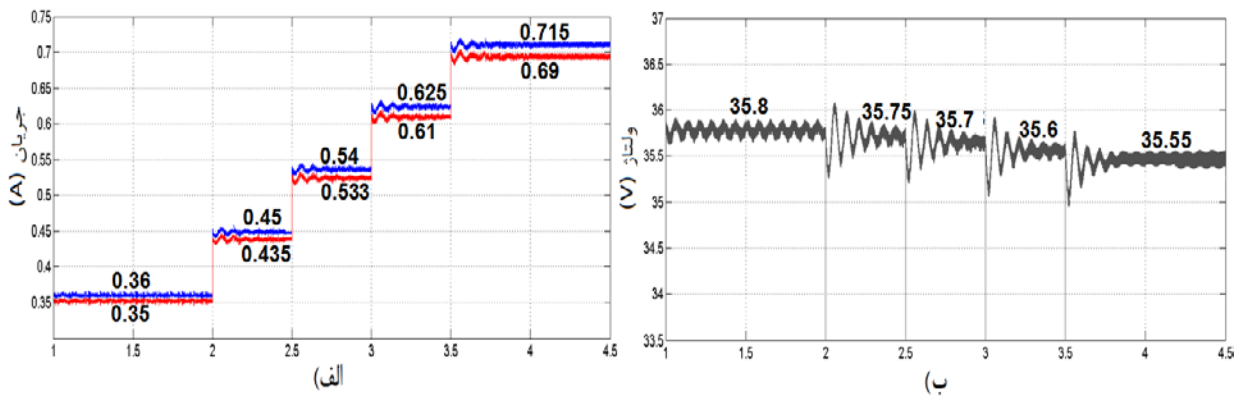
نتایج حاصل از شبیه سازی روش کنترل افقی متداول برای اعمال ضریب افقی بزرگ $R_{d1} = R_{d2} = 2$ به ازای افزایش ۲۵٪ جریان بار در ۴ مرحله به صورت زیر است:



شکل (۳-۳۵) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افقی متداول با ضریب افقی بزرگ $R_d = 2$ به ازای تغییرات کوچک مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

□ روش کنترل افقی تطبیقی

نتایج حاصل از شبیه سازی روش کنترل افقی تطبیقی به ازای افزایش ۲۵٪ جریان بار در ۴ مرحله به صورت زیر است:



شکل (۳-۳۶) الف) جریان خروجی مبدل‌ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی تطبیقی به ازای تغییرات کوچک مقاومت بار از $R_L = 25\Omega$ به $R_L = 50\Omega$

با مقایسه‌ی شکل (۳-۳۶) و شکل‌های (۳-۳۴) و (۳-۳۳) به این نتیجه می‌رسیم که روش پیشنهادی کنترل افی تطبیقی برای تغییرات کوچک بار به صورت مرحله به مرحله نیز قابلیت دستیابی به صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ بهتری را نسبت به روش کنترل افی متداول دارد. نتایج این قسمت نشان می‌دهند که تغییرات حالت گذرای ولتاژ و جریان نسبت به حالت تغییرات ناگهانی بزرگ، کاهش یافته‌اند.

۳-۸- جمع بندی

همانطور که مشاهده شد، روش کنترل افی تطبیقی پیشنهادی توانسته صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ مناسبی برای سیستم، متناسب با شرایط بارگذاری فراهم کند. در فصل بعدی یک روش کاملاً غیرمتمرکز برای تقسیم جریان در ریزشبه‌های DC ارائه می‌شود که برای محاسبه‌ی ضریب افی مناسب برای دستیابی به صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ مطلوب نیازی به فیدبک جریان و ولتاژ بار ندارد و ضریب افی مناسب را با استفاده از فیدبک‌های محلی محاسبه می‌کند.

فصل ۴: روش کنترل افی فازی برای تقسیم

توان در ریزشبه های DC

۴-۱- مقدمه

همانطور که قبلا نیز بیان شد یکی از اهداف این پایان نامه، ارائه‌ی یک روش کنترلی کاملا غیرمتمرکز برای یافتن ضرایب افتی مناسب به منظور دستیابی به صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ قابل قبول است. لذا در این قسمت روشی را معرفی می‌کند که برای یافتن ضرایب افتی مناسب، از یک الگوریتم دو قسمتی که یک بخش آن به صورت خارج از خط^۱ و بخش دیگر آن به صورت برخط^۲ اجرا می‌شود، استفاده می‌کند. بخش اول این الگوریتم، عبارتست از یک روش کنترل افتی فازی که با توجه به شرایط بارگذاری سیستم، مقدار مناسبی برای ضریب افتی مکانیزم افتی متداول فراهم می‌کند. بخش دوم این الگوریتم نیز که به صورت خارج از خط اجرا می‌شود، شامل یک روش جدید برای محاسبه‌ی مقدار ضریب افتی بهینه است که پارامترهای مکانیزم فازی را تنظیم می‌کند.

روش کار این الگوریتم پیشنهادی به این صورت است که مقادیر ضرایب افتی بهینه برای سه حالت بارگذاری مختلف با استفاده از یک شاخص افتی بهبود یافته^۳ به دست می‌آیند. یعنی به ازای سه جریان بار مختلف، ضریب افتی‌ای یافته می‌شود که به ازای آن، تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ مقادیر قابل قبولی داشته باشند. سپس از این سه ضریب افتی بدست آمده، برای تنظیم پارامترهای روش کنترل افتی فازی پیشنهادی استفاده می‌شود.

با این ساز و کار، بدون اینکه در هر لحظه برای محاسبه‌ی مقدار ضریب افتی بهینه، الگوریتم بهینه سازی را که یک عملیات زمان‌بر است تکرار شود، می‌توان مقدار مناسبی را برای ضریب افتی مورد استفاده در روش کنترل افتی یافت.

^۱ Off-line

^۲ On-line

^۳ Improved droop index

۲-۴- روش کنترل افی فازی بهبود یافته

۱-۲-۴- مکانیزم فازی

روش کنترل فازی که مستقیماً از قوانین فازی استفاده می‌کند، مهم‌ترین کاربرد در نظریه‌ی فازی است. عمدتاً سه مرحله برای ایجاد یک ساز و کار کنترل فازی در نظر گرفته می‌شود که در ادامه به بیان این سه مرحله پرداخته می‌شود.

۱) فازی سازی (با استفاده از توابع عضویت)

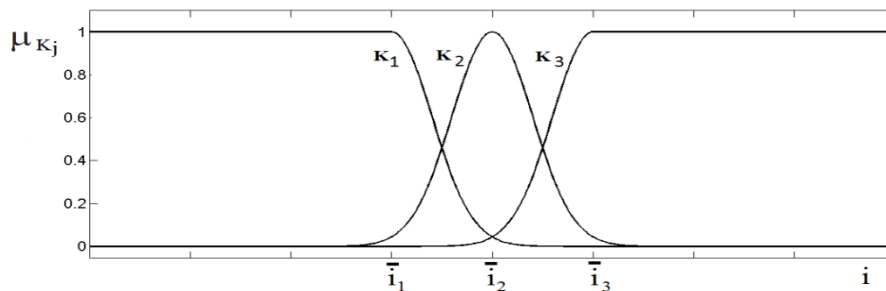
فازی سازی عبارتست از تبدیل هر عضو از یک مجموعه‌ی حقیقی معین به یک مقدار فازی بین ۰ و ۱، که به آن درجه عضویت گفته می‌شود. تابع عضویتی که مجموعه‌ی فازی K را ارائه می‌دهد، اغلب توسط μ_K مشخص می‌شود. برای یک مقدار i از مجموعه‌ی اعداد حقیقی I ، مقدار $\mu_K(i)$ درجه تابع عضویت i در مجموعه فازی K نامیده می‌شود. درجه‌ی عضویت $\mu_K(i)$ ، مرتبه‌ی عضویت عنصر i در مجموعه‌ی فازی K را تعیین می‌کند. مقدار ۰ یعنی که i عضو مجموعه‌ی فازی نیست. مقدار ۱ یعنی که i به طور کامل یک عضو از مجموعه‌ی فازی است. مقادیر بین ۰ و ۱ نیز عناصری را مشخص می‌کنند که تنها جزئی از مجموعه‌ی فازی هستند. به طور مثال در روش پیشنهادی، i جریان مبدل است که مقادیر آن زیرمجموعه‌ای از اعداد حقیقی I هستند و مقدار فازی متناظر با i توسط $\mu_K(i)$ مشخص می‌شود. لذا مجموعه‌ی فازی K در I به صورت مجموعه‌ای از جفت مرتب‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K = \{i, \mu_K(i) \mid i \in I\} \quad (1-4)$$

تابع عضویت استفاده شده در این روش، تابع عضویت با توزیع گاوسی است که نمودار آن در شکل (۱-۴) نشان داده شده است. این تابع عضویت را می‌توان به صورت زیر فرمول بندی کرد:

$$\mu_{K_j}(i) = \text{EXP}\left(\frac{-(i - \bar{i}_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (2-4)$$

که \bar{i}_j و σ_j به ترتیب مرکز و عرض زامین مجموعه‌ی فازی K_j هستند.



شکل (۱-۴) تابع عضویت با توزیع گوسی استفاده شده در روش کنترل افuzzy.

۲) استفاده از قوانین فازی

قوانین فازی عمدتاً به صورت اگر ... آنگاه ...^۱ تعریف می‌شوند. یعنی برای شرایط مختلف نتایج مختلفی را ارائه خواهند داد. در روش کنترل افuzzy پیشنهاد شده در این پایان نامه، قوانین فازی در سیستم استنتاج فازی TSK^۲ Zero Order به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\text{Rule } j : \text{if } I \text{ is } A_j \text{ Then } K_{d-fuzz} = \bar{K}_j \quad (j = 1, 2, 3)$$

۳) غیرفازی سازی (تولید نتایج واقعی)

غیر فازی سازی عبارت است از اختصاص اعداد حقیقی به ازای هر عضو از مجموعه‌ی فازی. یعنی تبدیل مقدار فازی به یک مقدار حقیقی.

این مرحله توسط روش‌های مختلفی پیاده سازی می‌شود که در این پایان نامه از روش متوسط وزن دار استفاده می‌شود. در این روش، هر تابع عضویت با حداکثر مقدار عضویتش وزن دار می‌شود. خروجی غیر فازی شده‌ی این روش توسط رابطه‌ی (۳-۴) بیان می‌گردد.

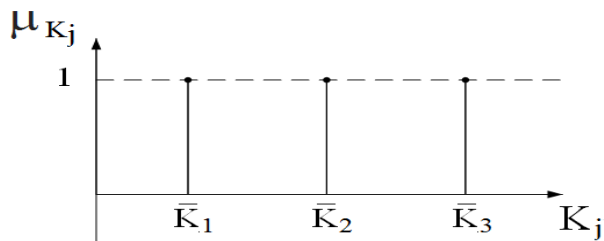
$$K_{d-fuzz}(i) = \frac{\sum_{j=1}^3 \mu_{K_j}(i) \bar{K}_j}{\sum_{j=1}^3 \mu_{K_j}(i)} \quad (3-4)$$

که K_{d-fuzz} مقدار غیرفازی شده و \bar{K}_j ضریب وزنی (حداکثر مقدار عضویت) تابع عضویت زام هستند.

^۱ If ... Then ...

^۲ Takagi-Sugeno-Kang

در روش پیشنهادی، \bar{K}_j به صورت خارج از خط تعیین می شود. همانطور که در شکل (۲-۴) مشاهده می شود، درجه ی عضویت عناصر \bar{i}_j که دارای مقدار \bar{K}_j هستند، برابر ۱ است.



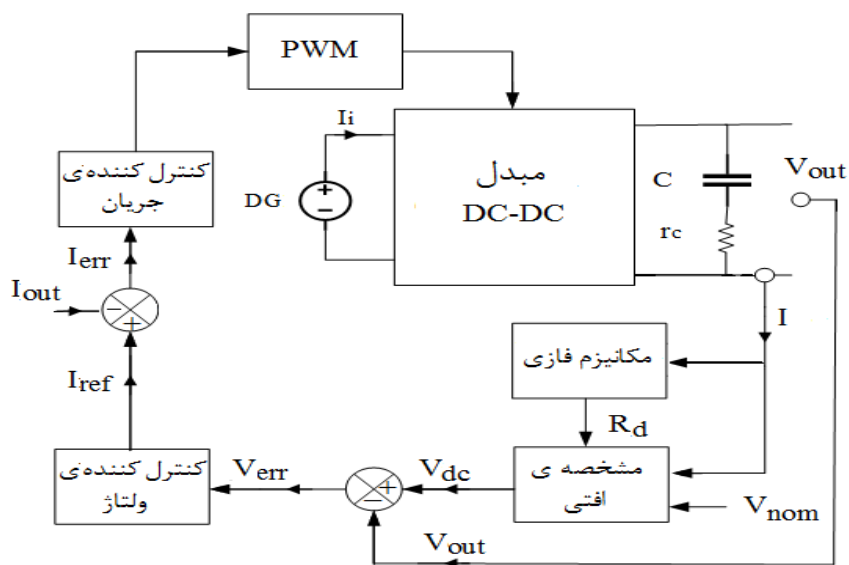
شکل (۲-۴) تابع عضویت نقطه ای برای روش پیشنهادی.

روش کنترل افuzzy پیشنهاد شده با منطق فازی را می توان توسط رابطه ی زیر بیان کرد:

$$V_{dc,n} = V_{ref,n} - K_{d-fuzz,n}(I_n) \times I_{dc,n} \quad (۴-۴)$$

که $V_{ref,n}$ ولتاژ مرجع و $I_{dc,n}$ جریان خروجی و $V_{dc,n}$ ولتاژ خروجی مبدل n ام و $K_{d-fuzz,n}$ مقدار ضریب افuzzy بدست آمده از روش منطق فازی است که متناسب با جریان خروجی مبدل n ام انتخاب می شود.

شماتیک کلی روش کنترل افuzzy بهبود یافته در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) شماتیک کلی روش کنترل افuzzy بهبود یافته ی پیشنهادی

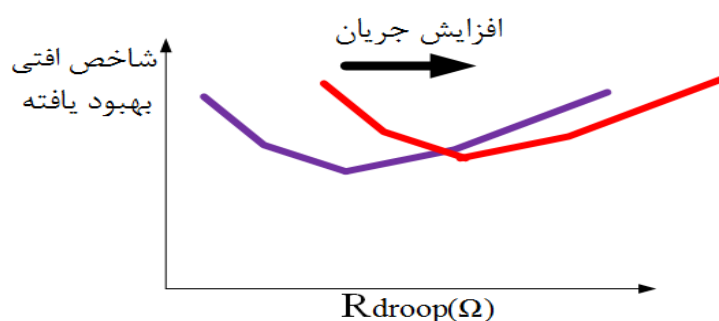
همانطور که می توان در شکل فوق مشاهده کرد، ضریب افتی مورد استفاده در روش افتی با استفاده از روش فازی پیشنهادی، متناسب با جریان مبدل محاسبه می شود که در قسمت بعد معرفی می گردد.

۲-۲-۴- تعیین ضریب افتی با استفاده از شاخص افتی بهبود یافته

همانطور که در فصل قبل نیز بیان شد، برای تعیین مقدار ضریب افتی باید طوری عمل شود که مصالحه ای بین دقت تقسیم جریان و مقدار انحراف ولتاژ یا تلفات سیستم برقرار گردد. همچنین مطلوبست با افزایش جریان بار، مقدار ضریب افتی معادل نیز افزایش یابد تا بتواند دقت تقسیم جریان را برای سیستم فراهم کند. برای این منظور، شاخصی تحت عنوان شاخص افتی بهبود یافته به صورت زیر معرفی می گردد:

$$IDI = \min \left[I_L \times |I_1 - I_2|_{Ni} + (P_{loss})_{Np} \right] \quad (5-4)$$

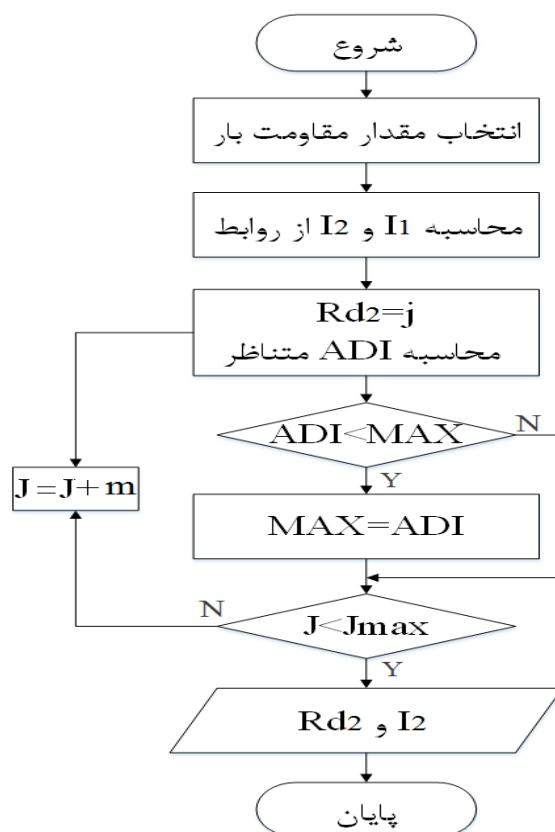
جریان بار در این شاخص به صورت یک ضریب برای وزندار کردن اختلاف تقسیم جریان به منظور افزایش ضریب افتی معادل به کار می رود. این شاخص، مقدار کمینه ی مجموع تلفات توان نرمالیزه شده و حاصلضرب جریان بار در مقدار نرمالیزه شده ی اختلاف جریان را در بازه ای مشخص تعیین می کند. N_p و N_i به ترتیب بیانگر ضرایب نرمالیزه کردن اختلاف جریان مبتنی بر جریان بار نامی و تلفات توان خروجی مبتنی بر حداکثر تلفات مجاز برحسب توان نامی مبدل هستند. شاخص افتی بهبود یافته به ازای دو جریان بار مختلف در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل (۴-۴) اثر افزایش جریان بر روی مقدار کمینه ی شاخص افتی تطبیقی.

حال با جایگذاری مقدار $|I_1 - I_2|$ و مقدار $p_{loss} = I_2^2 m + I_1^2 (R_1 + R_{d2})$ با توجه به مقادیر محاسبه شده I_1 و I_2 ، که از روابط (۳-۱۵) و (۳-۱۶) قابل محاسبه هستند در رابطه (۴-۵)، می توان با محاسبه مقدار کمینه شاخص، ضریب افتی ای را یافت که در آن تلفات و انحراف جریان مقادیر قابل قبولی داشته باشند.

فلوچارت روش محاسبه مقدار کمینه شاخص افتی بهبود یافته پیشنهادی در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل (۴-۵) فلوچارت روش محاسبه مقدار کمینه شاخص افتی بهبود یافته پیشنهادی

که R_{d2} ضریب افتی مبدل ۲، J شماره ی مرحله، m گام حلقه و J_{max} حداکثر ضریب افتی مجاز است که با توجه به حداکثر انحراف ولتاژ مجاز سیستم تعیین می شود.

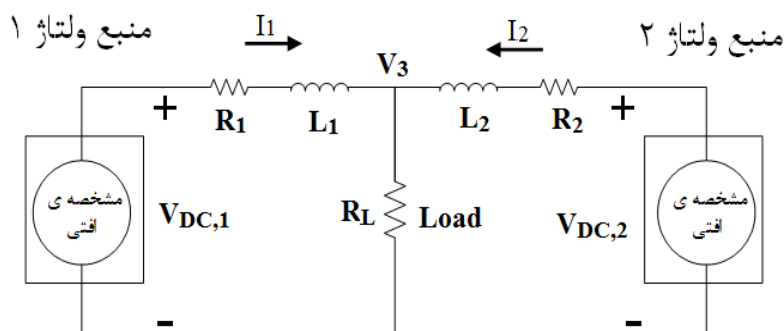
اکنون با استفاده از شاخص افتی بهبود یافته، مقادیر I_1 ، I_2 و R_{d2} را به ازای سه بار مقاومتی (شرایط بارگذاری کم، متوسط و سنگین) مختلف محاسبه می شود. مقدار I_1 بدست آمده به ازای بار m ام ($j = 1, 2, 3$)، برابر با نقطه ی $\bar{I}_{1,j}$ ، در روش منطق فازی خواهد بود. بطور مشابه

مقدار I_2 بدست آمده به ازای بار m ام ($j = 1, 2, 3$) نیز، برابر با نقطه‌ی $\bar{I}_{2,j}$ ، خواهد بود. مقادیر R_{d1} و R_{d2} بدست آمده در هر جریان بار نیز، با مقادیر $K_{1,j}$ و $K_{2,j}$ در روش منطق فازی برابر در نظر گرفته می‌شوند. به این طریق توانستیم برای روش منطق فازی ارائه شده در بخش قبل، پارامترهای مناسب را طوری انتخاب کنیم که ضرایب افتهی تولید شده توسط این روش، منجر به تقسیم توان صحیح با میزان تلفات قابل قبول برای سیستم شوند.

در روش فوق مقادیر R_{d1} و R_{d2} یکسان در نظر گرفته می‌شوند. از طرفی ضرایب بدست آمده از روش فوق منجر به یک تقسیم جریان صحیح می‌شوند که می‌توان جریانها را به ازای این ضرایب، تقریباً برابر در نظر گرفت. بنابراین یک کنترل کننده با مشخصات یکسان برای هر دو مبدل بکار گرفته می‌شوند.

۳-۴- تحلیل پایداری سیگنال کوچک

برای بررسی پایداری سیگنال کوچک سیستم، در هر خط انتقال یک سلف کوچک در نظر گرفته می‌شود [29]. مدل ساده‌ی شده‌ی یک ریزشکبه‌ی DC با دو واحد تولید پراکنده به همراه امپدانس خطوط اتصال به باس مشترک برای هر واحد در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل (۴-۶) مدل ساده شده‌ی ریزشکبه‌ی DC با دو واحد تولید پراکنده.

هنگامی که کنترل کننده‌ی ولتاژ، خیلی سریع‌تر از کنترل کننده‌ی افتهی فازی باشد، فرض می‌شود که ولتاژهای خروجی واحدهای تولید پراکنده با مرجع‌هایشان برابر هستند:

$$V_n = V_{dc,n} \quad n = 1, 2 \quad (۴-۶)$$

بنابراین رفتار دینامیکی سریع کنترل کننده ولتاژ در تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی سیستم در نظر گرفته نمی شود و فقط معادله اکتی فازی به عنوان عامل اصلی در پایداری ریز- شبکه ی DC در نظر گرفته می شود. با اعمال اغتشاش سیگنال کوچک برای معادله اکتی فازی و جایگزینی $V_{dc,n}$ از رابطه ی (۴-۶)، رابطه ی زیر بدست می آید:

$$\tilde{V}_n = -d(K_{d-fuzz}(I_n)) \cdot I_{n0} - K_{d-fuzz}(I_{n0}) \cdot \tilde{I}_n \quad (۷-۴)$$

که در آن، I_{n0} جریان نقطه ی کار واحد n ام ($n=1,2$) و متغیرهای دارای بالانویس (\sim)، متغیرهای دارای اغتشاش حول نقطه ی کار سیستم هستند.

ابتدا با اعمال دیفرانسیل در رابطه ی $K_{d-fuzz}(I_n)$ ، معادل عبارت $d(K_{d-fuzz}(I_n))$ در معادله ی فوق را می یابیم. برای این منظور، ابتدا با جایگذاری رابطه ی (۴-۲) در (۴-۳) داریم:

$$K_{dfuzz}(I_n) = \frac{\bar{K}_1 \cdot \text{EXP}\left(\frac{(I_n - \bar{I}_1)^2}{-2\sigma_1^2}\right) + \bar{K}_2 \cdot \text{EXP}\left(\frac{(I_n - \bar{I}_2)^2}{-2\sigma_2^2}\right) + \bar{K}_3 \cdot \text{EXP}\left(\frac{(I_n - \bar{I}_3)^2}{-2\sigma_3^2}\right)}{\text{EXP}\left(\frac{(I_n - \bar{I}_1)^2}{-2\sigma_1^2}\right) + \text{EXP}\left(\frac{(I_n - \bar{I}_2)^2}{-2\sigma_2^2}\right) + \text{EXP}\left(\frac{(I_n - \bar{I}_3)^2}{-2\sigma_3^2}\right)} \quad (۸-۴)$$

با دیفرانسیل گیری از رابطه ی (۸-۴) می توان $d(K_{d-fuzz}(I_n))$ را به صورت زیر نوشت:

$$d(K_{d-fuzz}(I_n)) = [(\bar{K}_1 a_1 b_1 (b_2 + b_3) + \bar{K}_2 a_2 b_2 (b_1 + b_3) + \bar{K}_3 a_3 b_3 (b_1 + b_2) - a_1 b_1 (\bar{K}_2 b_2 + \bar{K}_3 b_3) - a_2 b_2 (\bar{K}_1 b_1 + \bar{K}_3 b_3) - a_3 b_3 (\bar{K}_1 b_1 + \bar{K}_2 b_2)) \tilde{I}_j] / [\bar{K}_1^2 b_1^2 + 2\bar{K}_2 b_2 \bar{K}_1 b_1 + \bar{K}_2^2 b_2^2 + 2\bar{K}_3 b_3 \bar{K}_1 b_1 + 2\bar{K}_3 b_3 \bar{K}_2 b_2 + \bar{K}_3^2 b_3^2] \quad (۹-۴)$$

$$a_j = \frac{(\bar{I}_j - I_{n0})}{\sigma_j^2} \quad \& \quad b_j = \text{EXP}\left(\frac{-(I_{n0} - \bar{I}_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad j = 1, 2, 3$$

با جایگذاری مقدار I_{n0} در (۸-۴)، می توان عبارت $K_{d-fuzz}(I_{n0})$ را به صورت زیر نوشت:

$$K_{d-fuzz}(I_{n0}) = \frac{\bar{K}_1 \cdot \text{EXP}\left(\frac{(I_{n0} - \bar{I}_1)^2}{-2\sigma_1^2}\right) + \bar{K}_2 \cdot \text{EXP}\left(\frac{(I_{n0} - \bar{I}_2)^2}{-2\sigma_2^2}\right) + \bar{K}_3 \cdot \text{EXP}\left(\frac{(I_{n0} - \bar{I}_3)^2}{-2\sigma_3^2}\right)}{\text{EXP}\left(\frac{(I_{n0} - \bar{I}_1)^2}{-2\sigma_1^2}\right) + \text{EXP}\left(\frac{(I_{n0} - \bar{I}_2)^2}{-2\sigma_2^2}\right) + \text{EXP}\left(\frac{(I_{n0} - \bar{I}_3)^2}{-2\sigma_3^2}\right)} \quad (۱۰-۴)$$

همانطور که گفته شد، برای تحلیل پایداری سیستم، کابل به صورت یک مقاومت سری شده با یک سلف کوچک، مدل سازی می شود. با اعمال قانون KVL در مدار شکل (۴-۶) داریم:

$$V_1 - V_3 = r_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} \quad (11-4)$$

$$V_2 - V_3 = r_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} \quad (12-4)$$

$$V_3 = r_L (I_1 + I_2) \quad (13-4)$$

با به کار بردن اغتشاش سیگنال کوچک برای روابط (۴-۱۱) الی (۴-۱۳)، می توان این روابط را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\tilde{V}_1 - \tilde{V}_3 = r_1 \tilde{I}_1 + L_1 \frac{d\tilde{I}_1}{dt} \quad (14-4)$$

$$\tilde{V}_2 - \tilde{V}_3 = r_2 \tilde{I}_2 + L_2 \frac{d\tilde{I}_2}{dt} \quad (15-4)$$

$$\tilde{V}_3 = r_L (\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2) \quad (16-4)$$

با جایگذاری از رابطه ی (۴-۷) در روابط (۴-۱۴) الی (۴-۱۶)، می توان نوشت:

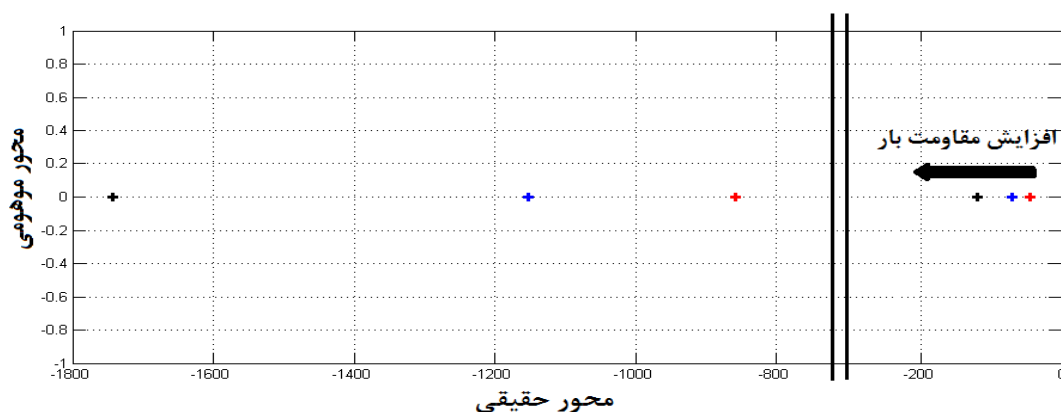
$$\begin{bmatrix} \frac{d\tilde{I}_1}{dt} \\ \frac{d\tilde{I}_2}{dt} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \end{bmatrix} \quad (17-4)$$

که در آن ماتریس A، به ازای $C_j = d(K_{dfuzz}(I_j))/\tilde{I}_j$ برابر است با:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-C_1 I_{10} - K_{d-fuzz}(I_{10}) - r_L - r_1}{L_1} & \frac{-r_L}{L_1} \\ \frac{-r_L}{L_2} & \frac{-C_2 I_{20} - K_{d-fuzz}(I_{20}) - r_L - r_2}{L_2} \end{bmatrix} \quad (18-4)$$

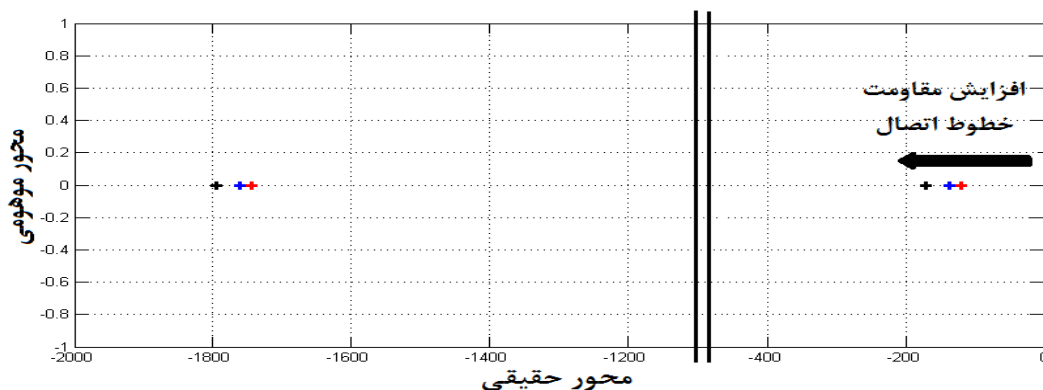
۴-۳-۲- مکان هندسی ریشه‌ها

با استفاده از نرم افزار متلب، می توان مکان هندسی ریشه‌ها را به ازای تغییر پارامترهای کنترلی سیستم در روش کنترل افتی فازی ترسیم نمود. شکل (۷-۴) (۷-۴) جابجایی مقادیر ویژه سیستم را به ازای تغییر مقاومت بار نشان می‌دهد. با افزایش مقاومت بار، مقادیر ویژه سیستم به سمت چپ محور موهومی حرکت می‌کنند. یعنی پایداری سیستم بهبود می‌یابد.



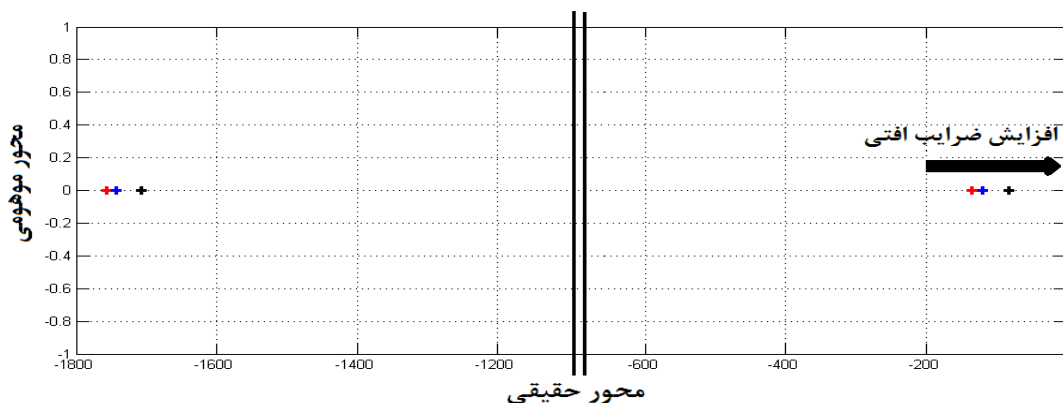
شکل (۷-۴) اثر افزایش مقاومت بار بر روی مقادیر ویژه سیستم در روش کنترل افتی فازی پیشنهادی

شکل (۸-۴) اثر افزایش مقاومت خط اتصال بر روی مقادیر ویژه سیستم در روش کنترل افتی فازی پیشنهادی را نمایش می‌دهد. جابجایی مقادیر ویژه سیستم به سمت چپ محور موهومی نشان دهنده پایداری سیستم نسبت به افزایش مقاومت خطوط اتصال است.



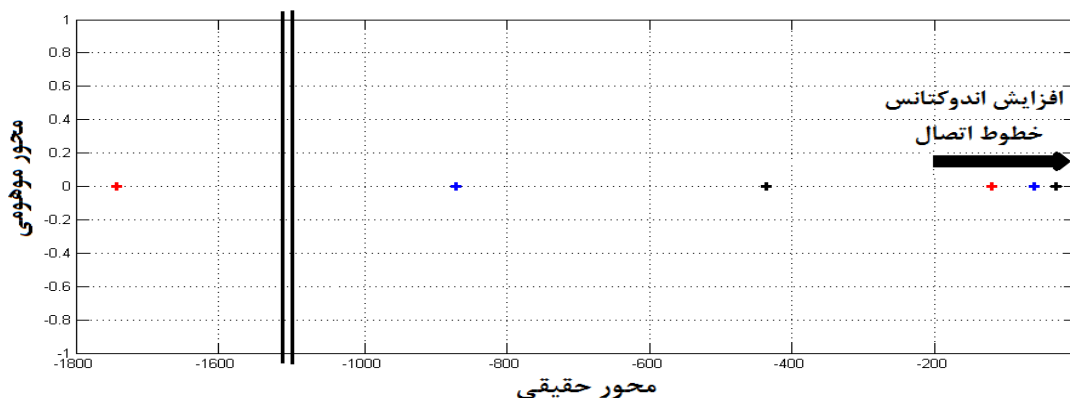
شکل (۸-۴) اثر افزایش مقاومت خط اتصال بر روی مقادیر ویژه سیستم در روش کنترل افتی فازی پیشنهادی

شکل (۹-۴) اثر افزایش ضرایب افی بر روی مقادیر ویژه سیستم را نشان می دهد، بیانگر این نکته است که افزایش بیش از حد ضرایب افی (ضرایب ثابت در روش فازی)، پایداری سیستم را به خطر می اندازد.



شکل (۹-۴) اثر افزایش ضرایب افی بر روی مقادیر ویژه سیستم در روش کنترل افی فازی پیشنهادی

شکل (۱۰-۴) نشان می دهد که افزایش اندوکتانس خط باعث حرکت مقادیر ویژه سیستم به سمت محور موهومی و ناپایداری سیستم خواهد شد.

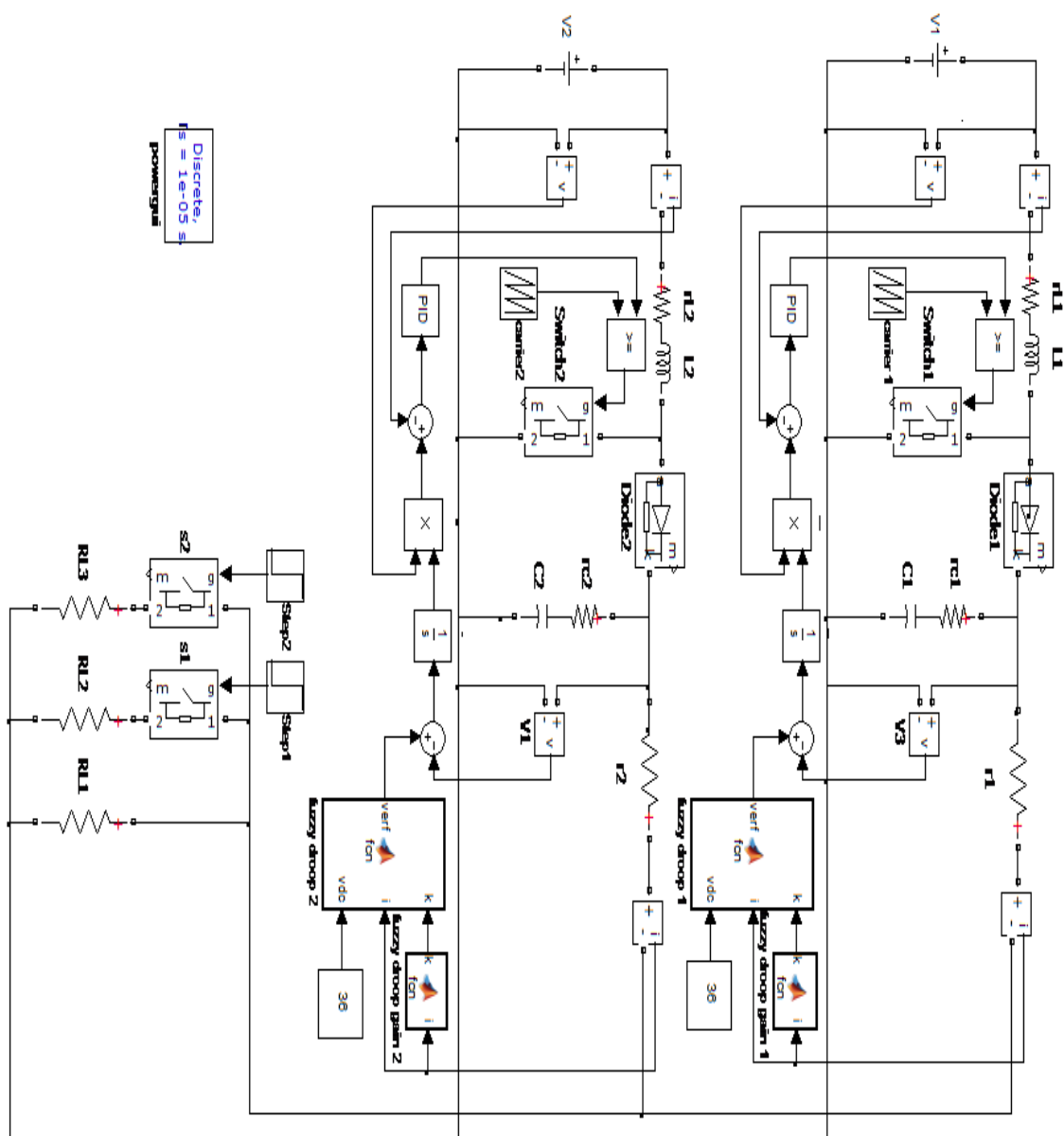


شکل (۱۰-۴) اثر افزایش اندوکتانس خط بر روی مقادیر ویژه سیستم در روش کنترل افی فازی پیشنهادی

در نتیجه افزایش مقاومت خط و مقاومت بار باعث بهبود پایداری سیستم تحت کنترل روش افی فازی بهبود یافته می شود. در عوض، افزایش ضرایب افی و اندوکتانس خط باعث کاهش پایداری سیستم می گردند.

۴-۴- شبیه سازی و پیاده سازی آزمایشگاهی روش کنترل افی فازی بهبود یافته

شماتیک کلی سیستم تست شبیه سازی شده تحت کنترل افی فازی پیشنهادی در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۱) شماتیک کلی سیستم تست شبیه سازی شده تحت کنترل افی فازی پیشنهادی

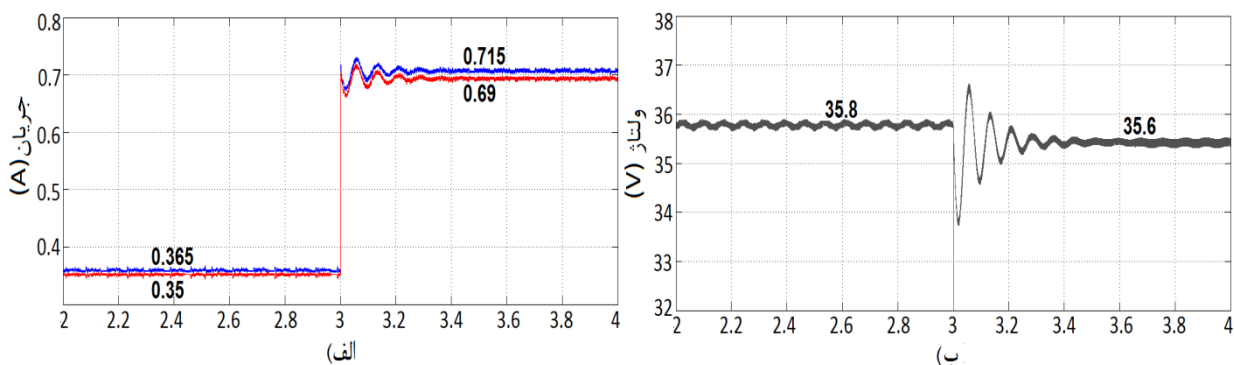
برای شبیه سازی روش کنترل افی فازی، مقدار جریان خروجی اندازه گیری شده ی مبدل به یک بلوک محاسباتی برای تعیین ضریب افی مبتنی بر منطق فازی وارد می شود. در مرحله ی بعد، ضریب افی محاسبه شده به یک ساز و کار کنترل افی داده می شود. این ساز و کار با کاهش مرجع ولتاژ متناسب با میزان جریان و ضریب افی محاسبه شده، یک مرجع ولتاژ جدید برای تقسیم جریان صحیح بین مبدل ها تولید می کند. این مرجع ولتاژ جدید به منظور ردیابی توسط مبدل، به حلقه ی کنترل ولتاژ بیرونی که در قسمت قبل تشریح شد وارد می شود.

۲-۴-۴- بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی

□ بررسی عملکرد روش کنترل افی فازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی فازی پیشنهاد شده به ازای شرایط مختلف بارگذاری نمایش داده شده و مورد بررسی قرار می گیرد.

الف) کاهش ناگهانی مقاومت بار



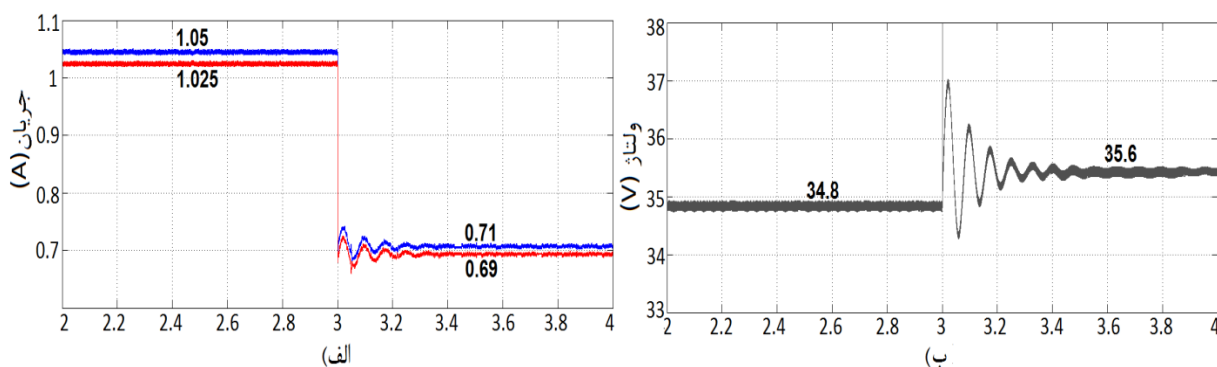
شکل (۱۲-۴) الف) جریان خروجی مبدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی فازی پیشنهادی به ازای کاهش مقاومت بار از $R_l = 50\Omega$ به $R_l = 25\Omega$

همانطور که در شکل (۱۲-۴) قابل مشاهده است، به ازای $R_l = 50\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۳٪ شکل (۱۲-۴) الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۰/۶٪ شکل (۱۲-۴) ب) می باشند. با مقایسه ی شکل (۱۲-۴) با نتایج بخش ۳-۷-۱ می توان دریافت که میزان انحراف ولتاژ در روش پیشنهادی

نسبت به روش کنترل اکتی با ضریب اکتی بزرگ، بهبود یافته است و اختلاف جریان آن نسبت به روش کنترل اکتی با ضریب اکتی کوچک کاهش یافته است. لازم به ذکر است در شرایط بارگذاری کم، اختلاف جریان و انحراف ولتاژ سیستم کوچک هستند.

در این حالت با کاهش مقاومت بار و افزایش جریان بار، مقدار انحراف ولتاژ سیستم و میزان اختلاف جریان دو مبدل افزایش می یابند. ولی میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم در این حالت نسبت به حالت استفاده از ضریب اکتی بزرگ کمتر است. همچنین میزان افزایش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب اکتی کوچک کاهش می یابد.

ب) افزایش ناگهانی مقاومت بار



شکل (۴-۱۳) الف) جریان خروجی مبدلها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل اکتی فازی پیشنهادی به ازای افزایش مقاومت بار از $R_l = 16.6\Omega$ به $R_l = 25\Omega$

در این حالت، اختلاف جریان و انحراف ولتاژ به ازای $R_l = 16.6\Omega$ ، حدوداً ۳٪ شکل (۴-۱۳) الف و ب) می باشند. همانطور که مشاهده می شود این روش توانسته در شرایط بارگذاری زیاد نیز، اختلاف جریان کمتری نسبت به روش کنترل اکتی با ضریب اکتی کوچک و انحراف ولتاژ کمتری نسبت به روش کنترل اکتی با ضریب اکتی بزرگ برای سیستم فراهم کند.

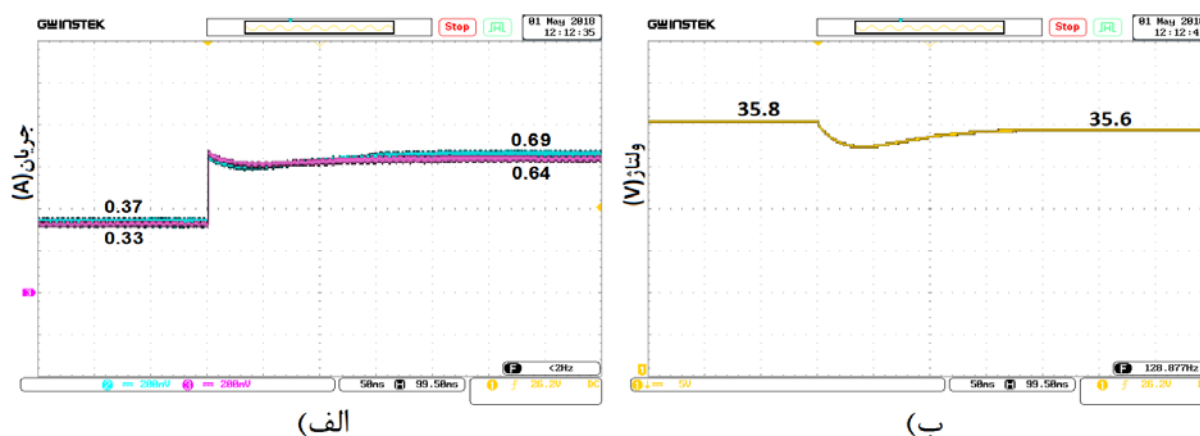
در این حالت نیز با افزایش مقاومت بار، میزان انحراف ولتاژ سیستم و میزان اختلاف جریان دو مبدل کاهش می یابند. ولی میزان کاهش انحراف ولتاژ سیستم در این حالت نسبت به حالت استفاده از ضریب اکتی بزرگ کمتر است. همچنین میزان کاهش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب اکتی کوچک نیز کاهش می یابد.

۳-۴-۴- بررسی نتایج حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افتی فازی بهبود یافته

□ بررسی عملکرد روش کنترل افتی فازی بهبود یافته

در این بخش نتایج حاصل از پیاده سازی روش کنترلی پیشنهاد شده بر روی سیستم نمونه-ی آزمایشگاهی به ازای شرایط مختلف بارگذاری نمایش داده شده و مورد بررسی قرار می گیرد.

الف) کاهش ناگهانی مقاومت بار

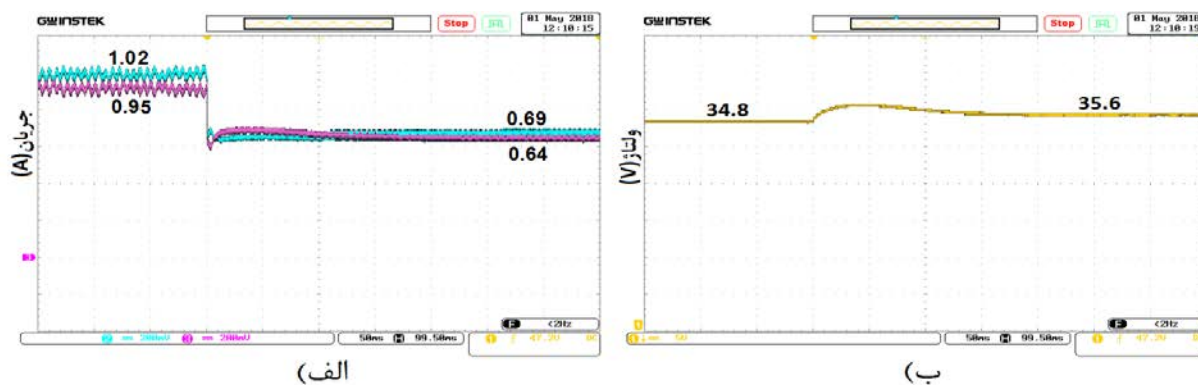


شکل (۱۴-۴) الف) جریان خروجی مبدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افتی فازی پیشنهادی به ازای کاهش مقاومت بار از $R_l = 50\Omega$ به $R_l = 25\Omega$

همانطور که در شکل (۱۴-۴) مشاهده می شود، به ازای $R_l = 50\Omega$ ، اختلاف جریان حدوداً ۳٪ (شکل ۱۴-۴ الف) و انحراف ولتاژ حدوداً ۰/۶٪ (شکل ۱۴-۴ ب) است. میزان انحراف ولتاژ در این روش نسبت به روش کنترل افتی با ضریب افتی بزرگ بهبود یافته و اختلاف جریان آن نسبت به روش کنترل افتی با ضریب افتی کوچک کاهش یافته است. با کاهش مقاومت بار و به تبع آن افزایش جریان بار نیز، میزان انحراف ولتاژ سیستم و میزان اختلاف جریان دو مبدل افزایش می یابند. ولی میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم در این حالت نسبت به حالت استفاده از ضریب افتی بزرگ کمتر است. همچنین میزان افزایش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب افتی کوچک کاهش می یابد.

ب) افزایش ناگهانی مقاومت بار

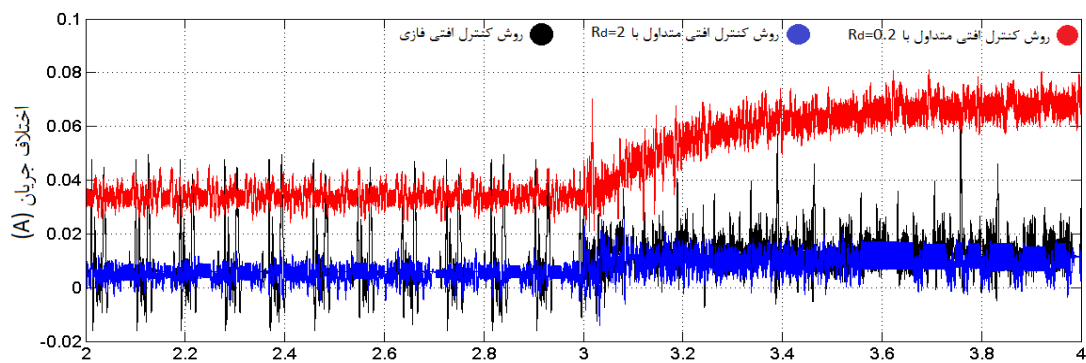
همانطور که در شکل (۴-۱۵) مشاهده می شود اختلاف جریان و انحراف ولتاژ به ازای $R_L = 16.6\Omega$ ، حدوداً ۳٪ می باشند. نتایج نشان می دهند که این روش توانسته در شرایط بارگذاری زیاد نیز، اختلاف جریان کمتری نسبت به روش کنترل افتی با ضریب افتی کوچک و انحراف ولتاژ کمتری نسبت به روش کنترل افتی با ضریب افتی بزرگ برای سیستم فراهم کند. همچنین با افزایش مقاومت بار و به تبع آن کاهش جریان بار، مقدار انحراف ولتاژ سیستم و میزان اختلاف جریان دو مبدل کاهش می یابند. ولی میزان کاهش انحراف ولتاژ سیستم در این حالت نسبت به حالت استفاده از ضریب افتی بزرگ کمتر است. همچنین میزان کاهش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب افتی کوچک نیز کمتر می شود.



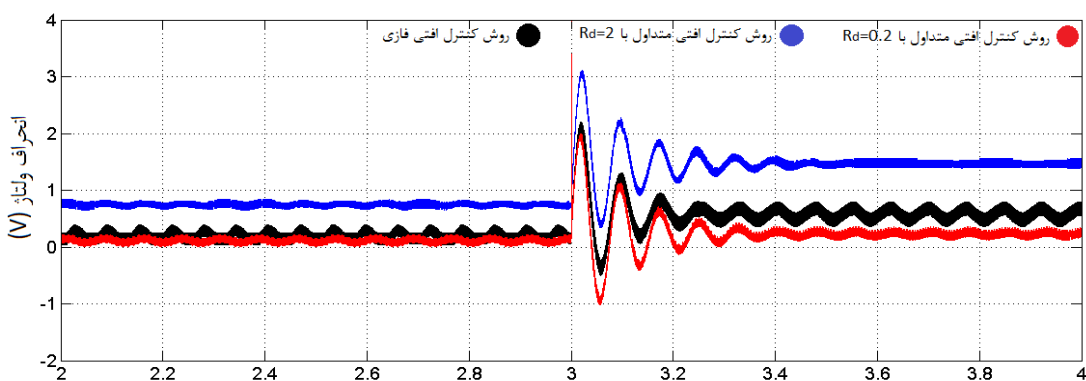
شکل (۴-۱۵) الف) جریان خروجی مبدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از پیاده سازی عملی روش کنترل افتی فازی پیشنهادی به ازای افزایش مقاومت بار از $R_L = 16.6\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

۴-۴-۴- مقایسه‌ی نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی روش کنترل افتی تطبیقی با نتایج روش کنترل افتی متداول

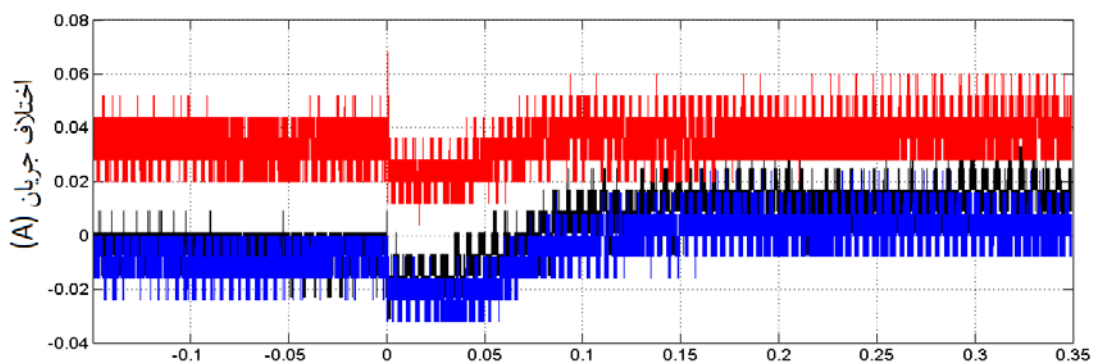
در این قسمت برای مقایسه‌ی بهتر عملکرد روش کنترل افتی متداول و روش کنترل افتی فازی بهبود یافته، مقدار اختلاف جریان مبدل ها و میزان انحراف ولتاژ باس DC از ولتاژ نامی (ولتاژ نامی اعمال شده به مکانیزم افتی) برای شبیه سازی و پیاده سازی هر کدام از روش های کنترل افتی متداول با ضریب افتی بزرگ، کوچک و روش کنترل افتی فازی بهبود یافته به ازای یک تغییر بار مشخص در یک نمودار رسم می شوند.



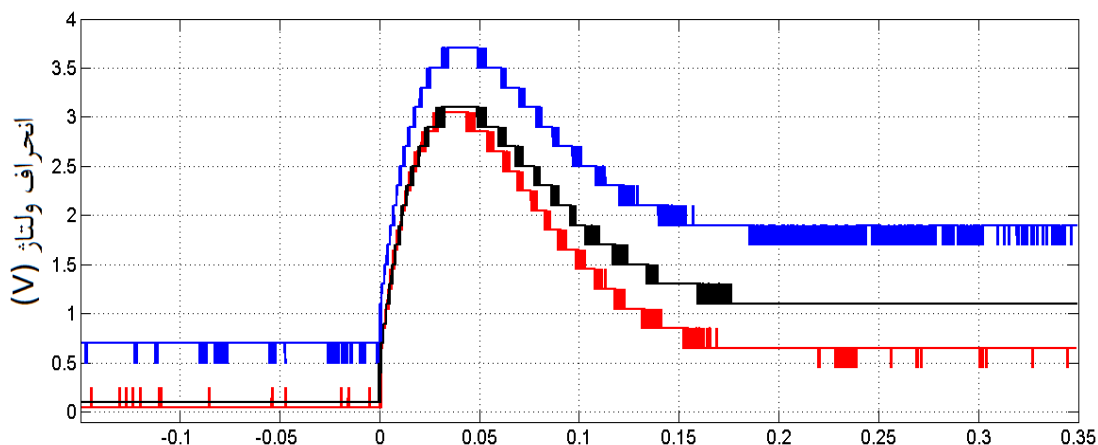
شکل (۴-۱۶) اختلاف جریان دو مبدل به ازای شبیه سازی روش های کنترل افقی متداول با ضرایب افقی کوچک و بزرگ و روش کنترل افقی فازی



شکل (۴-۱۷) انحراف ولتاژ باس DC به ازای شبیه سازی روش های کنترل افقی متداول با ضرایب افقی کوچک و بزرگ و روش کنترل افقی فازی



شکل (۴-۱۸) اختلاف جریان دو مبدل به ازای پیاده سازی عملی روش های کنترل افقی متداول با ضرایب افقی کوچک و بزرگ و روش کنترل افقی فازی



شکل (۴-۱۹) انحراف ولتاژ باس DC به ازای پیاده سازی عملی روش های کنترل افتهی متداول با ضرایب افتهی کوچک و بزرگ و روش کنترل افتهی فازی

با مقایسه ی نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی عملی روش کنترل افتهی متداول و روش فازی بهبود یافته، می توان نکات زیر را بیان کرد:

- ۱- میزان انحراف ولتاژ در روش کنترل افتهی فازی بهبود یافته نسبت به روش کنترل افتهی با ضریب افتهی بزرگ بهبود یافته است.
- ۲- میزان اختلاف جریان در روش کنترل افتهی فازی بهبود یافته نسبت به روش کنترل افتهی با ضریب افتهی کوچک کاهش یافته است.
- ۳- میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم در حالت استفاده از روش کنترل فازی بهبود یافته نسبت به حالت استفاده از ضریب افتهی بزرگ کمتر است. همچنین میزان افزایش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب افتهی کوچک کاهش یافته است.
- ۴- میزان کاهش انحراف ولتاژ سیستم در حالت استفاده از روش کنترل فازی بهبود یافته نسبت به حالت استفاده از ضریب افتهی بزرگ کمتر است. همچنین میزان کاهش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب افتهی کوچک نیز کاهش می یابد.
- ۵- روش کنترل افتهی تطبیقی توانسته تا حدودی در شرایط بارگذاری زیاد از لحاظ صحت تقسیم جریان عملکردی بهتری نسبت به روش کنترل افتهی فازی بهبود یافته ارائه دهد ولی تنظیم ولتاژ آن مقداری افزایش یافته است.

لازم به ذکر است که روش کنترل فازی بهبود یافته نسبت به روش کنترل افتری تطبیقی، حجم محاسبات کمتر و به تبع آن سرعت بالاتری دارد. در ضمن روش کنترل فازی بهبود یافته نیاز به هیچ گونه ارتباطات بین مبدل ها ندارد بنابراین قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به روش کنترل افتری تطبیقی برای سیستم فراهم می کند.

مقایسه‌ی عملکرد روش‌های شبیه سازی شده در جدول (۴-۱) آورده شده است.

جدول (۴-۱) مقایسه‌ی عملکرد روش‌های شبیه سازی شده.

شاخص روش	اختلاف جریان در شرایط بارگذاری کم	اختلاف جریان در شرایط بارگذاری زیاد	انحراف ولتاژ در شرایط بارگذاری کم	انحراف ولتاژ در شرایط بارگذاری زیاد
کنترل افتری با ضریب افتری کوچک	۱۰٪	۱۰٪	۰/۱۵٪	۱/۲٪
کنترل افتری با ضریب افتری بزرگ	۲٪	۲٪	۱/۶٪	۰/۱۶٪
کنترل افتری فازی پیشنهادی	۳٪	۳٪	۰/۱۶٪	۳٪
کنترل افتری تطبیقی پیشنهادی	۳٪	۲/۵٪	۰/۱۶٪	۳/۵٪

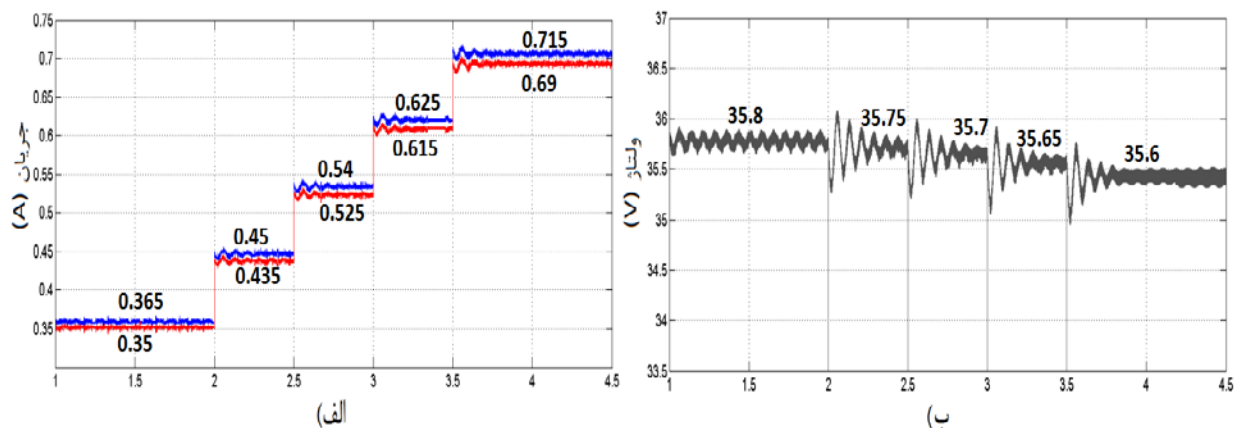
جدول (۴-۱) نشان می دهد که هر دو روش پیشنهاد شده توانسته اند عملکرد بهتری نسبت به روش کنترل افتری متداول ارائه دهند. این روش ها از لحاظ صحت تقسیم جریان نسبت به روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری کوچک کارایی بهتری دارند. همچنین تنظیم ولتاژ سیستم را نسبت به حالت استفاده از روش کنترل افتری متداول با ضریب افتری بزرگ بهبود ببخشد. همانطور که مشاهده می شود این روش ها عملکرد تقریباً یکسانی دارند با این تفاوت که روش کنترل افتری تطبیقی با محاسبه‌ی دقیق ضریب افتری بهینه توانسته در شرایط بارگذاری زیاد، صحت تقسیم جریان بیشتری را نسبت به روش کنترل افتری فازی ارائه دهد. البته لازم به ذکر است که این اختلاف بسیار ناچیز در مقایسه با سرعت بالاتر و حجم محاسبات کمتر و همچنین عدم نیاز به ارتباطات در این روش نسبت به روش کنترل افتری تطبیقی قابل چشم پوشی است.

۴-۵- شبیه سازی روش کنترل افی فازی بهبود یافته برای اعمال تغییرات کوچک بار به صورت مرحله به مرحله

در این قسمت، کاهش مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$ طی ۴ مرحله، با تغییرات کوچک به سیستم اعمال می شود.

□ روش کنترل افی فازی بهبود یافته

نتایج حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی فازی بهبود یافته به ازای افزایش ۲۵٪ جریان بار در ۴ مرحله به صورت زیر است:



شکل (۴-۲۰) الف) جریان خروجی مبدل ها (ب) ولتاژ بار حاصل از شبیه سازی روش کنترل افی فازی بهبود یافته به ازای تغییرات کوچک مقاومت بار از $R_L = 50\Omega$ به $R_L = 25\Omega$

با مقایسه ی شکل (۴-۲۰) و شکل های (۳-۳۴) و (۳-۳۳) می توان نتیجه گرفت که روش کنترل افی فازی بهبود یافته، برای تغییرات کوچک بار به صورت مرحله به مرحله نیز قابلیت دستیابی به صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ بهتری را نسبت به روش کنترل افی متداول دارد. نتایج این قسمت نشان می دهند که تغییرات حالت گذرای ولتاژ و جریان نسبت به حالت تغییرات ناگهانی بزرگ، کاهش یافته اند.

۴-۱- جمع بندی

همانطور که مشاهده شد، روش کنترل افتری فازی بهبود یافته پیشنهادی توانسته صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ مناسبی برای سیستم، متناسب با شرایط بارگذاری فراهم کند. همچنین برای پیاده سازی این روش، به ارتباطات بین مبدل‌ها برای انتقال سیگنال‌های ولتاژ و جریان بار، نیازی نیست. لذا نسبت به روش کنترل افتری تطبیقی، قابلیت اطمینان بیشتری را برای سیستم فراهم می‌کند. علاوه بر این، به دلیل اینکه حجم محاسبات روش کنترل افتری فازی برای محاسبه‌ی ضریب افتری مناسب نسبت به روش کنترل افتری تطبیقی خیلی کمتر است، لذا در مقایسه با روش کنترل افتری تطبیقی، از سرعت بیشتری نیز برخوردار است.

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه به منظور دستیابی به صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ قابل قبول به طور همزمان و در شرایط بارگذاری مختلف در ریزشکته‌های DC، دو روش کنترلی تحت عنوان روش کنترل افی تطبیقی و روش کنترل افی فازی بهبود یافته پیشنهاد گردید.

روش کنترل افی تطبیقی، با استفاده از مشخصات سیستم و میزان بارگذاری، با به کار گیری یک شاخص افی تطبیقی، یک ضریب افی مناسب برای حصول صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ مطلوب ارائه می‌دهد.

روش کنترل افی فازی بهبود یافته، برای محاسبه‌ی ضریب افی مناسب به منظور دستیابی به صحت تقسیم جریان و تنظیم ولتاژ قابل قبول، از یک مکانیزم فازی استفاده می‌کند که مشخصات آن توسط یک شاخص افی بهبود یافته تنظیم می‌گردد.

از مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه سازی و پیاده سازی عملی روش‌های پیشنهادی با نتایج حاصل از به کارگیری روش کنترل افی متداول می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱- میزان انحراف ولتاژ در روش‌های پیشنهادی نسبت به روش کنترل افی متداول با ضریب افی بزرگ بهبود یافته است.

۲- میزان اختلاف جریان در روش پیشنهادی نسبت به روش کنترل افی متداول با ضریب افی کوچک کاهش یافته است.

۳- میزان افزایش انحراف ولتاژ سیستم در حالت استفاده از روش‌های پیشنهادی نسبت به حالت استفاده از ضریب افی بزرگ کمتر است. همچنین میزان افزایش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب افی کوچک کاهش یافته است.

۴- میزان کاهش انحراف ولتاژ سیستم در حالت استفاده از روش‌های پیشنهادی نسبت به حالت استفاده از ضریب افی بزرگ کمتر است. همچنین میزان کاهش اختلاف جریان دو مبدل نسبت به حالت استفاده از ضریب افی کوچک نیز کاهش یافته است.

۵- عملکرد روش کنترل افی تطبیقی در شرایط بارگذاری زیاد از لحاظ صحت تقسیم جریان کمی نسبت به روش کنترل افی فازی بهبود یافته بهتر است ولی از طرف دیگر تنظیم ولتاژ آن تا حدودی بیشتر از روش کنترل فازی بهبود یافته است.

۵-۲- پیشنهادات

با توجه به پژوهش به عمل آمده و نتایج حاصل از آن، پیشنهادات زیر جهت کارهای بعدی ارائه می‌گردد.

۱- استفاده از یک تخمین گر امپدانس برای محاسبه‌ی دقیق و لحظه‌ای مقاومت خطوط اتصال برای استفاده در روش‌های پیشنهاد شده به منظور یافتن ضریب افتی مناسب.

۲- لحاظ کردن مقاومت نقاط اتصال کابل به مبدل و کابل به باس DC در محاسبات روش-های پیشنهادی به منظور افزایش دقت محاسبات و یافتن بهترین ضریب افتی مخصوصا برای نمونه‌ی آزمایشگاهی.

۳- گسترش روابط بیان شده در روش‌های پیشنهادی برای به کار گیری این روش‌ها در سیستم‌های با بیش از دو مبدل موازی.

۴- تنظیم کنترل کننده‌های محلی برای یکسان کردن ولتاژهای مرجع با استفاده از جریان گردشی، برای ولتاژهای مرجع اولیه نابرابر.

مراجع

-
- [1]S. Augustine and N. Lakshminarasamma, “Control of Photovoltaic-Based Low-Voltage Dc Microgrid System for Power Sharing With Modified Droop Algorithm” *IET Power Electronics*, Vol. 9, No. 6, PP. 1132-1143, 2016.
- [2]V. Nasirian and A. Davoudi “Distributed Adaptive Droop Control for DC Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 29, No. 4, PP. 944- 956, 2014.
- [3]C.N. Papadimitriou and E.I. Zountouridou, “Review of Hierarchical Control in DC Microgrids”, *Elsevier Electric Power Systems Research*, Vol. 122, PP. 159–167, 2015.
- [4]A. Khorsandi and M. Ashourloo, “Automatic Droop Control for a Low Voltage DC Microgrid” *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, No. 1, PP. 41-47, 2016.
- [5]S. Augustine and M. K. Mishra, “Adaptive Droop Control Strategy for Load Sharing and Circulating Current Minimization in Low-Voltage Standalone DC Microgrid”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 6, No. 1, PP. 132- 141, 2015.
- [6]J.B. Wang, “Parallel DC/DC Converters System With a Novel Primary Droop Current Sharing Control” , *IET Power Electronics*, Vol. 5, No. 8, PP. 1569 - 1580, 2012.
- [7]S. Anand and B.G. Fernandes, “Modified Droop Controller for Paralleling of Dc–Dc Converters in Standalone Dc System” *IET Power Electronics*, Vol. 5, No. 6, PP. 782-789, 2012.
- [8]T. Dragicevic and J. M. Guerrero, “Supervisory Control of an Adaptive-Droop Regulated DC Microgrid with Battery Management Capability”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 2, PP. 695- 706, 2014.
- [9] Michael D. Cook, Gordon G. Parker, Rush D. Robinett, Wayne W. Weaver, “Decentralized Mode-Adaptive Guidance and Control for DC Microgrid”, *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 32, NO. 1, PP. 263 – 271, 2016.
- [10] Pedram Ghalebani, Mohsen Niasati, “A Distributed Control Strategy Based on Droop Control and Low-Bandwidth Communication in DC Microgrids with Increased Accuracy of Load Sharing”, *Elsevier, Sustainable Cities and Society*, vol. 40, PP. 155-164, 2018.
- [11]J. Zhao and F. Dorfler, “Distributed control and optimization in DC microgrids”, *Elsevier Automatica*, Vol. 61, PP. 18–26, 2015.
- [12] Sajjad Golshannavaz, Vahid MortezaPour, “A generalized Droop Control Approach for Islanded DC Microgrids Hosting Parallel-Connected DERs”, *Elsevier, Sustainable Cities and Society*, Vol. 36, PP. 237-245, 2018.
- [13] Yang Mi, Han Zhang, Yang Fu, Chengshan Wang, Poh Chiang Loh, Peng Wang,, “Intelligent Power Sharing of DC Isolated Microgrid Based on Fuzzy Sliding Mode Droop Control”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018.

- [14] Ali Maknouninejad, Zhihua Qu, Frank L. Lewis, Ali Davoudi, "Optimal, Nonlinear, and Distributed Designs of Droop Controls for DC Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 5, 2014.
- [15] Yanghong Xia, Yonggang Peng, Huiyong Hu, Yu Wang, "Advanced unified decentralised control method with voltage restoration for DC microgrids", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 10, No. 6, 2016.
- [16] Peyghami, Hossein Mokhtari, Frede Blaabjerg, "Decentralized Load Sharing in an LVDC Microgrid with an Adaptive Droop Approach Based on a Superimposed Frequency", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 5, No. 3, PP. 1205 – 1215, 2017.
- [17] Ling Yang, Yandong Chen, An Luo, Wenhua Wu, Kunshan Huai, Xiaoping Zhou, Leming Zhou, Qianming Xu, Josep M. Guerrero, "Second Ripple Current Suppression by Two Band-Pass Filters and Current Sharing Method for Energy Storage Converters in DC Microgrid", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 5, No. 3, PP. 1031 – 1044, 2017.
- [18] M. B. Shadmand and R. S. Balog, "Model Predictive Control of PV Sources in a Smart DC Distribution System: Maximum Power Point Tracking and Droop Control", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 29, No. 4, PP. 913- 921, 2014.
- [19] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, Toshifumi Ise, "Distribution Voltage Control for DC Microgrids Using fuzzy control and Gain-scheduling technique", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 5, PP. 2246 – 2258, 2013.
- [20] N. Yang and D. Paire, "Compensation of Droop Control Using Common Load Condition in DC Microgrids to Improve Voltage Regulation and Load Sharing", *Elsevier, International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 64, PP. 752–760, 2015.
- [21] X. Lu and J. M. Guerrero, "An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication with DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 4, PP. 1800- 1812, 2014.
- [22] Hart, Daniel W. (Author), *Power Electronics*, Indiana: Valparaiso University.
- [23] Ibanez Federico, Echeverria Jose, Fontan Luis, "Master-Slave DC Droop Control for Paralleling Auxiliary DC/DC Converters in Electric Bus Applications", *IET Power Electronics*, Vol. 10, No. 10, PP. 1156 – 1164, 2017.
- [24] Dong Chen, Lie Xu, "Autonomous DC Voltage Control of a DC Microgrid With Multiple Slack Terminals", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 4, PP. 1897 – 1905, 2012.
- [25] Tuyen V. Vua, Dallas Perkinsa, Fernand Diaza, David Gonsoulina, Chris S. Edringtona, Touria El-Mezyani, "Robust Adaptive Droop Control for DC Microgrids", *Electric Power Systems Research*, Volume 146, PP. 95-106, 2017.

- [26] Kaitlyn J. Bunker, Wayne W. Weaver, “Multidimensional Droop Control for Wind Resources in Dc Microgrids”, *IET Generation Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 3, PP. 657 – 664, 2017.
- [27] Yunjie Gu, Xin Xiang, Wuhua Li, Xiangning He, “Mode-Adaptive Decentralized Control for Renewable DC Microgrid With Enhanced Reliability and Flexibility”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 9, PP. 5072 – 5080, 2014.
- [28] Qianwen Xu, Xiaolei Hu, Peng Wang, Jianfang Xiao , Pengfei Tu, Changyun Wen, Meng Yeong Lee “A Decentralized Dynamic Power Sharing Strategy for Hybrid Energy Storage System in Autonomous DC Microgrid”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 7, PP. 5930 – 5941, 2016.
- [29] André P. N. Tahim, Daniel J. Pagano, Eduardo Lenz, Vinicius Stramosk, “ Modeling and Stability Analysis of Islanded DC Microgrids under Droop Control”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 8, PP. 4597 – 4607, 2015.
- [30] Chendan Li, Federico de Bosio, Fang Chen, Sanjay K. Chaudhary, Juan C. Vasquez, Josep M. Guerrero, “Economic Dispatch for Operating Cost Minimization under Real Time Pricing in Droop Controlled DC Microgrid”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 5, No. 1, PP. 587 – 595, 2016.
- [31] Fei Zhao, Ningning Li, Zhenggang Yin, Xisheng Tang , “Small Signal Modeling and Stability Analysis of DC Microgrid with Multiple Type of Loads”, *International Conference on Power System Technology*, 2014.
- [32] Xiaonan Lu, Kai Sun, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez, Lipei Huang, and Jianhui Wang, “Stability Enhancement Based on Virtual Impedance for DC Microgrids With Constant Power Loads”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 6, PP. 2770 – 2783, 2015.
- [33] Mei Su, Zhangjie Liu, Yao Sun, Hua Han, Xiaochao Hou, “Stability Analysis and Stabilization Methods of DC Microgrid with Multiple Parallel-Connected DC-DC Converters Loaded by CPLs”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 1, PP. 132 – 142, 2018.
- [34] Fatih Cingoz, Ali Elrayyah, Yilmaz Sozer, “Optimized Settings of Droop Parameters Using Stochastic Load Modeling for Effective DC Microgrids Operation”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, No. 2, PP. 1358 – 1371, 2017.
- [35] Nelson L. Diaz, Juan C. Vasquez, Josep M. Guerrero, “Intelligent Distributed Generation and Storage Units for DC Microgrids—A New Concept on Cooperative Control Without Communications Beyond Droop Control”, *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, Vol. 5, No. 5, PP. 2476 - 2485, 2014.
- [36] Prajof Prabhakaran, Yogendra Goyal, Vivek Agarwal, “Novel Nonlinear Droop Control Techniques to Overcome the Load Sharing and Voltage Regulation Issues in DC Microgrid”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 5, PP. 4477 – 4487, 2018.

- [37] Avisha Tah and Debapriya Das, "An Enhanced Droop Control Method for Accurate Load Sharing and Voltage Improvement of Isolated and Interconnected DC Microgrids", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 7, No. 3, PP. 1194 – 1204, 2016.
- [38] Amir Khorsandi, Mojtaba Ashourloo, Student Member, IEEE, Hossein Mokhtari, "A Decentralized Control Method for a Low Voltage DC Microgrid", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 29, No. 4, PP. 793 – 801, 2014.
- [39] Sandeep Anand, Baylon G. Fernandes, Josep M. Guerrero, "Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 4, PP. 1900 – 1913, 2013.
- [40] Panbao Wang, Xiaonan Lu, Xu Yang, Wei Wang, Dianguo Xu, "An Improved Distributed Secondary Control Method for DC Microgrids with Enhanced Dynamic Current Sharing Performance", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 9, PP. 6658 – 6673, 2016.
- [41] Vahidreza Nasirian, Seyedali Moayedi, Ali Davoudi, Frank L. Lewis, "Distributed Cooperative Control of DC Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 4, PP. 2288 – 2303, 2015.
- [42] Po-Hsu Huang, Po-Chun Liu, Weidong Xiao, Mohamed Shawky El Moursi, "A Novel Droop-Based Average Voltage Sharing Control Strategy for DC Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 3, PP. 1096 – 1106, 2015.
- [43] Ji Xiang, Yu Wang, Yanjun Li, Wei Wei, "Stability and Steady State Analysis of Distributed Cooperative Droop Controlled DC Microgrids", *IET Control Theory Applications*, Vol. 10, No. 18, PP. 2490 – 2496, 2016.
- [44] Li Guo, Shaohui Zhang, Xialin Li, Yunwei Li, Chengshan Wang, Yibin Feng, "Stability Analysis and Damping Enhancement Based on Frequency Dependent Virtual Impedance for DC Microgrids", *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 5, No. 1, PP. 338 - 350 , 2017.
- [45] Mohsen Hamzeh, Amin Ghazanfari, Yasser Abdel-Rady, I. Mohamed, Yaser Karimi, "Modeling and Design of an Oscillatory Current Sharing Control Strategy in DC Microgrids", *Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 11, PP. 6647 – 6657, 2015.
- [46] Muralidhar Killi, Susovon Samanta, "Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 9, PP. 5549 – 5559, 2015
- [47] Dhivya A, Murali D, "Average Current Mode Control Technique Applied to Boost Converter for Power factor Improvement and THD Reduction", *IJISSET International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 3, Issue 2, 2016.

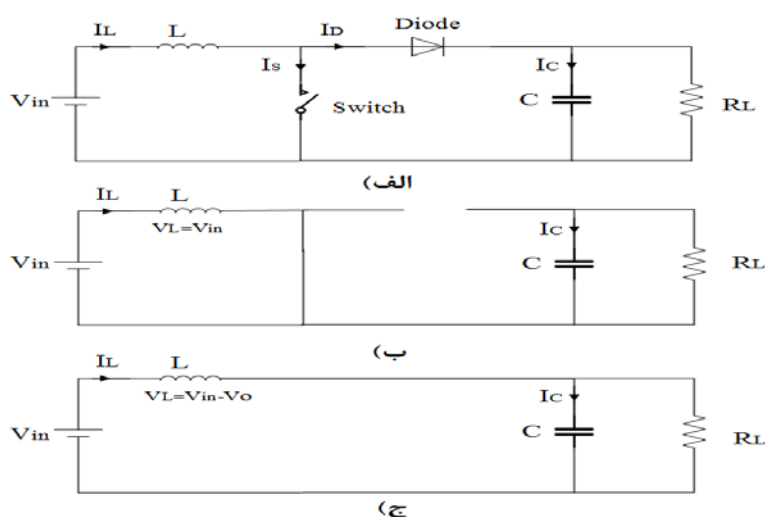
- [48] Kashif Habib, Aftab Alam, Shahbaz Khan, Rooh ul Amin, Syed M Ali, "Average Current Control Mode Boost Converter For The Tuning Of Total Harmonic Distortion & Power Factor Correction Using PSIM", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 14, No. 5-F, 2014.
- [49] Erickson, Robert W.(Author), *Fundamentals of Power Electronics*, Second Edition, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [50] eZdsp™ F2812 Technical Reference, September 2003.

پیوست‌ها

پیوست ۱

در تحلیل حالت جریان پیوسته، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

۱. شرایط حالت دائم وجود دارد.
 ۲. دوره‌ی تناوب کلیدزنی T است و کلید برای مدت زمان DT بسته است.
 ۳. جریان سلف پیوسته و همیشه مثبت است.
 ۴. خازن خیلی بزرگ است و ولتاژ خروجی در مقدار ثابت V_o نگه داشته می‌شود.
 ۵. عناصر ایده آل در نظر گرفته می‌شوند.
- تحلیل ولتاژ و جریان سلف، برای حالت‌های کلید بسته و حالت کلید باز انجام می‌شود.



شکل (۱-۵) : (الف) مدار معادل مبدل افزایشنده برای ؛ (ب) حالت کلید بسته (ج) حالت کلید باز [۲۲].

تحلیل برای حالت کلید بسته

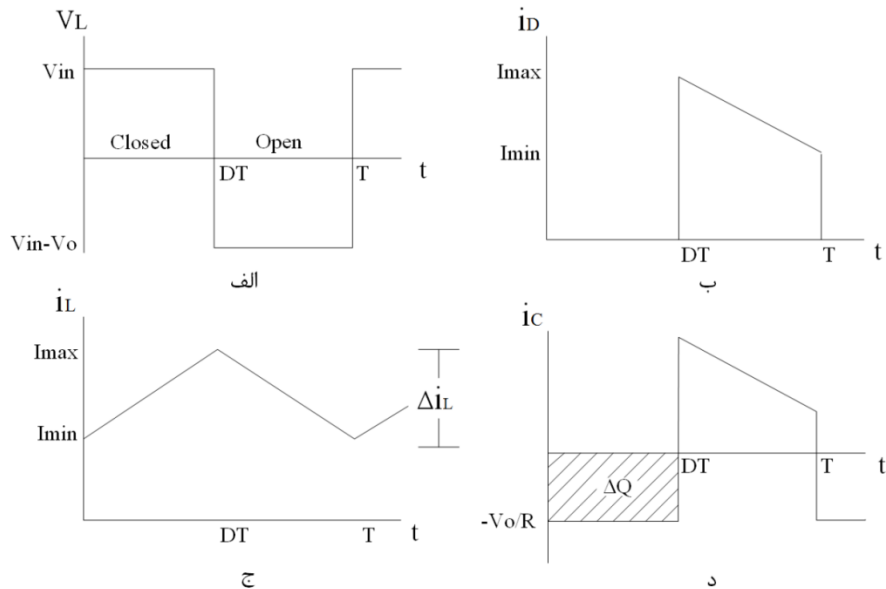
هنگامی که کلید بسته است، دیود بایاس معکوس است. قانون KVL حول مسیری که شامل

منبع، سلف و کلید بسته است، به صورت زیر است:

$$V_L = V_{in} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1-5)$$

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

نرخ تغییرات جریان ثابت است، بنابراین هنگامی که کلید بسته است جریان به طور خطی افزایش پیدا می‌کند که در شکل (۲-۵) (ب) نشان داده شده است.



شکل (۲-۵) شکل موج‌های مبدل افزایشنده (الف) ولتاژ سلف؛ (ب) جریان دیود؛ (ج) جریان سلف؛ (د) جریان خازن [22].

تغییرات در جریان سلف از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L} \quad (2-5)$$

که Δi_L برای حالت کلید بسته به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$(\Delta i_L)_{Closed} = \frac{V_{in} DT}{L} \quad (3-5)$$

تحلیل برای حالت کلید باز

هنگامی که کلید باز است، جریان سلف نمی‌تواند به صورت ناگهانی تغییر کند، بنابراین دیود بایاس مستقیم شده تا مسیری را برای عبور جریان سلف فراهم کند. با فرض ثابت بودن ولتاژ خروجی V_o ، ولتاژ دو سر سلف به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (4-5)$$

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

با توجه به اینکه نرخ تغییرات جریان سلف ثابت است، هنگامی که کلید باز است جریان به صورت خطی تغییر می‌کند. تغییرات جریان سلف در این حالت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (5-5)$$

Δi_L برای حالت کلید باز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$(\Delta i_L)_{Open} = \frac{(V_{in} - V_o)(1-D)T}{L} \quad (6-5)$$

برای کار در حالت جریان پیوسته، تغییرات خالص در جریان سلف باید صفر باشد. با استفاده از معادلات (3-5) و (6-5) می‌توان نوشت:

$$(\Delta i_L)_{Closed} + (\Delta i_L)_{Open} = 0 \quad (7-5)$$

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

با ساده سازی رابطه‌ی فوق می‌توان نوشت:

$$V_{in}(D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0 \quad (8-5)$$

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

رابطه‌ی (8-5) نشان می‌دهد که اگر کلید همیشه باز (D برابر با صفر) باشد، ولتاژ خروجی برابر با ولتاژ ورودی خواهد بود. افزایش نسبت وظیفه، باعث کوچکتر شدن مخرج رابطه‌ی (8-5) و در نتیجه بزرگتر شدن ولتاژ خروجی خواهد شد. لذا ولتاژ خروجی مبدل افزایشده همیشه بزرگتر یا مساوی ولتاژ ورودی خواهد بود.

شکل موج‌های ولتاژ و جریان مبدل افزایشده در شکل (4-2) نشان داده شده‌اند.

جریان متوسط سلف با توجه به اینکه توان متوسط فراهم شده توسط منبع باید با توان متوسط جذب شده توسط بار مقاومتی برابر باشد، تعیین می‌گردد. توان خروجی برابر است با:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} = V_o I_o \quad (9-5)$$

مقدار توان ورودی برابر است با $V_{in} I_{in}$ ، با برابر قرار دادن توانهای ورودی و خروجی و با استفاده از رابطه‌ی (5-8) می‌توان نوشت:

$$V_o I_L = \frac{V_o^2}{R} = \frac{[V_{in} / (1-D)]^2}{R} = \frac{V_{in}^2}{(1-D)^2} R \quad (10-5)$$

با محاسبه‌ی جریان متوسط سلف و جایگزینی روابط، I_L را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$I_L = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} = \frac{V_o^2}{V_{in} R} = \frac{V_o I_L}{V_{in}} \quad (11-5)$$

حداکثر و حداقل جریان سلف، با استفاده از مقدار متوسط و تغییرات جریان از رابطه‌ی (5-)

(3) بدست می‌آیند:

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} + \frac{V_{in} DT}{2L} \quad (12-5)$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} - \frac{V_{in} DT}{2L}$$

رابطه‌ی (5-8) با این فرض که جریان سلف پیوسته و همیشه مثبت است، بدست آمده است.

یک شرط ضروری برای اینکه جریان سلف پیوسته باشد این است که I_{\min} مثبت باشد. بنابراین مرز بین جریان سلف پیوسته و ناپیوسته از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$I_{\min} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} - \frac{V_{in} DT}{2L} = 0 \quad (13-5)$$

$$\frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} = \frac{V_{in} DT}{2L} = \frac{V_{in} D}{2Lf}$$

بنابراین حداقل مقدار سلف برای پیوسته بودن جریان در مبدل افزایشده برابر است با:

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (14-5)$$

یک مبدل افزایشده که برای عملکرد جریان پیوسته طراحی شده است، دارای مقدار سلف بزرگتر از L_{\min} خواهد بود. از دیدگاه طراحی، بیان L بر حسب مقدار Δi_L مورد نظر نیز مفید خواهد بود.

$$L = \frac{V_{in} DT}{\Delta i_L} = \frac{V_{in} D}{\Delta i_L f} \quad (15-5)$$

ریپل ولتاژ خروجی

معادلات قبل بر اساس این فرض که ولتاژ خروجی ثابت و خازن بی نهایت است بدست آمدند. در عمل مقدار محدود خازن منجر به نوساناتی در ولتاژ خروجی یا همان ریپل ولتاژ خواهد شد. پیک تا پیک ریپل ولتاژ خروجی را می‌توان از شکل موج جریان خازن محاسبه نمود که در شکل (۵-۲) (د) نشان داده شده است. تغییرات در بار خازن را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_o}{R} \right) DT = C \Delta V_o \quad (16-5)$$

بنابراین رابطه‌ای به صورت زیر برای ریپل ولتاژ بدست می‌آید:

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT}{RC} = \frac{V_o D}{RCf} \quad (17-5)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (18-5)$$

که f فرکانس کلیدزنی است. ظرفیت خازن بر حسب ریپل ولتاژ خروجی برابر است با:

$$C = \frac{D}{R(\Delta V_o / V_o) f} \quad (19-5)$$

پیوست ۲



TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332
 TMS320F28235, TMS320F28234, TMS320F28232
 Digital Signal Controllers (DSCs)

SPRS439C – JUNE 2007 – REVISED FEBRUARY 2008

1 TMS320F2833x, TMS320F2823x 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) (2833x only)
 - 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 Interface (XINTF)
 - Over 2M x 16 Address Reach
- On-Chip Memory
 - F28335/F28235: 256K x 16 Flash, 34K x 16 SARAM
 - F28334/F28234: 128K x 16 Flash, 34K x 16 SARAM
 - F28332/F28232: 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
- GPIO0 to GPIO63 Pins 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
- 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 8 32-bit/Six 16-bit Timers
- Three 32-Bit CPU Timers
- Serial Port Peripherals
 - Up to 2 CAN Modules
 - Up to 3 SCI (UART) Modules
 - Up to 2 McBSP Modules (Configurable as SPI)
 - One 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)
 - Plastic BGA (ZJZ)
- Temperature Options:
 - A: –40°C to 85°C (PGF, ZHH, ZJZ)
 - S: –40°C to 125°C (ZJZ)

(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, TMS320C54x, TMS320C55x, C28x are trademarks of Texas Instruments.

ADVANCE INFORMATION concerns new products in the sampling or preproduction phase of development. Characteristic data and other specifications are subject to change without notice.

Copyright © 2007–2008, Texas Instruments Incorporated

ADVANCE INFORMATION

Abstract:

Recently, the use of microgrids and renewable energy resources especially DC microgrids have been increased. In this regard, the accurate power sharing among the distributed energy resources is crucial in the DC microgrids.

In this dissertation, the power sharing based on the droop characteristics is studied. In this regard, firstly, the concept of droop method as a decentralized power sharing method is expressed. In order to improve the performance of the droop based power sharing two control methods called adaptive droop control and fuzzy based modified droop control methods have been proposed. In this dissertation, the two proposed methods have been used to share the electric power properly between two DC-DC converters. The proposed methods have been simulated on a test system in the Simulink software to perform power sharing between two parallel DC-DC converters. After that, in order to show the performance of the proposed methods practically, they have been implemented on an experimental setup system. The simulation results of the proposed droop based methods have been compared with the conventional droop method. The comparison shows that the proposed methods, have better performance compare with the conventional method. Also, the proposed fuzzy based method have been compared with adaptive method and the results shown that the fuzzy based method has better performance and easier implementation in DC Microgrids.

Similarly, this comparison has been also performed between the experimental and simulation results for the proposed methods. The experimental as well as the simulation results have indicated validity and capability of the proposed methods in power sharing in a DC microgrid .

Key words: Voltage regulation, Circulating current, DC microgrid, Improved droop index, Adaptive droop index, Current sharing accuracy, Droop gain, Fuzzy droop control.



Shahrood University of Technology
Department of Electrical and Robotic Engineering

The use of Droop Characteristics in Load Sharing in DC Microgrids

By:

Amir mohammad Shahri

Supervisor:

Dr. Mahdi Banejad

Assistant Supervisor:

Dr. Ali Akbarzadeh Kalat

Dr. Ali Dastfan

July

2018