

بهبود کیفیت توان و کاهش هارمونیک در ریزشبه هیبرید با استفاده از مبدل واسط

احسان اکبری^{۱*}

^{۱*} دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران. e.akbari@ustmb.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از منابع تجدیدپذیر به دلیل کاهش آلودگی و هزینه‌ها نسبت به ژنراتورهای سنتی سوخت فسیلی، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای مدیریت و کارایی بهتر این منابع از ساختار ریزشبه استفاده می‌شود. در این مقاله به بهبود کیفیت توان و کاهش هارمونیک در ریزشبه هیبرید با استفاده از مبدل واسط پرداخته شده است. بدین منظور از یک مبدل پشتیبان شبکه برای بهبود اشتراک توان و کاهش اختلالات کیفیت توان استفاده شده است. اجزای ریزشبه مورد نظر شامل واحدهای تولید پراکنده، بارهای AC، بارهای DC، سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتری) و مبدل‌های متصل‌کننده موازی می‌باشد. در توپولوژی ریزشبه ترکیبی AC/DC مورد مطالعه در این مقاله، دو مبدل اصلی وجود دارد، یکی مبدل تشکیل‌دهنده شبکه که یک مبدل واسط است و برای کنترل ولتاژ ریزشبه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مبدل دوم، مبدل VSC می‌باشد که بین لینک DC (شامل ریزشبه DC و باتری) و ریزشبه AC قرار می‌گیرد. در این مقاله سیستم کنترلی برای یک ریزشبه ترکیبی پیاده‌سازی شد و شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب برای چهار سناریو مختلف مربوط به توان اکتیو و راکتیو ریزشبه و بارها انجام گرفتند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم مدیریت انرژی و کنترل توان و همچنین بخشی از سیستم که هدفش بهبود کیفیت توان و کاهش هارمونیک در ریزشبه ترکیبی AC/DC می‌باشد در تمامی شرایط به خوبی عملکرده است و ساختار پیشنهادی در این مقاله دارای عملکرد بسیار خوبی می‌باشد. پس از عملکرد بخش کنترلی مربوط به جبران‌سازی هارمونیک در ریزشبه، میزان THD در حدود ۱/۸۷٪ بوده و حتی از مقدار اولیه کمتر می‌باشد که نشان دهنده بهبود کیفیت توان سیستم می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که کلیه شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزاری MATLAB/SIMULINK انجام گرفته است.

واژه‌های کلیدی: کیفیت توان، کاهش هارمونیک، ریزشبه، مبدل واسط.

۱. مقدمه

در سال های اخیر به دلیل افزایش روزافزون نگرانی های زیست محیطی و اقتصادی، استفاده از تولیدات پراکنده^۱ (DG) که غالباً از انرژی های تجدیدپذیر استفاده می کنند، به شدت در حال افزایش است. برای فراهم کردن امکان استفاده هرچه بیشتر از منابع تولید پراکنده و رفع چالش های ناشی از حضور تولیدات پراکنده در شبکه های قدرت، مفهوم جدیدی به نام ریزشبکه^۲ (MG) معرفی شد. در ابتدا ریزشبکه ها به دو نوع ریزشبکه AC و ریزشبکه DC تقسیم می شد. هر یک از این ساختارها با مزایا و معایب خاصی همراه می باشد. به عنوان مثال در ریزشبکه های AC، منابع AC نظیر توربین های بادی می توانند به صورت مستقیم به ریزشبکه متصل شوند. از طرف دیگر، بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر منابع فتوولتائیک و همچنین منابع ذخیره ساز انرژی الکتریکی دارای توان خروجی DC می باشند و اتصال آن ها به ریزشبکه DC از نظر هزینه و راندمان انرژی مناسب تر است. علاوه بر این، در ریزشبکه های DC مسائل مربوط به کنترل فرکانس و کنترل توان راکتیو حذف شده است. با توجه به این مسائل، در جهت استفاده از مزایای هر دو نوع ریزشبکه، ریزشبکه های ترکیبی AC/DC معرفی شد که مزایای هر دو ریزشبکه را به صورت هم زمان محقق می سازد. با توجه به مزایای فراوان ریزشبکه های ترکیبی AC/DC نسبت به سایر ریزشبکه ها، امروزه استفاده از آن به سرعت در حال افزایش می باشد [۱]. در ریزشبکه ترکیبی AC/DC، ریزشبکه های AC و DC با استفاده از مبدل های دوجته AC/DC به یکدیگر متصل می شوند که به این مبدل ها، مبدل واسط گفته می شود. بنابراین یکی از مهم ترین قسمت های ریزشبکه های ترکیبی AC-DC، مبدل اصلی می باشد. نقش اصلی این مبدل انتقال توان به صورت دوجته بین ریزشبکه های AC و DC و همچنین تثبیت ولتاژ در ریزشبکه DC و کنترل ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه AC در نزدیکی مقادیر مرجع آن ها می باشد. در ساختارهای معمول، ریزشبکه های AC به صورت مستقیم به ترانسفورماتور شبکه AC متصل شده و ریزشبکه DC نیز از طریق یک یا چند اینورتر موازی به ریزشبکه AC متصل می شود [۲]. رایج ترین ساختار مبدل واسط، اینورتر سه فاز دو سطحی شش کلیده می باشد. در این ساختار، برای بهبود قابلیت کنترل و افزایش ظرفیت توان قابل انتقال و افزایش قابلیت اطمینان، معمولاً چندین مبدل به صورت موازی به کار برده می شود. در این شرایط بحث جریان چرخشی و اختلاف تقسیم توان برای مبدل های موازی پیش می آید که منجر به کاهش پایداری، کاهش ظرفیت انتقال توان و افزایش تلفات انرژی می شود. ساختارهای دیگری نیز برای مبدل های واسط وجود دارد با این وجود، بیشتر این ساختار چند ضعف عمده دارند که عبارت اند از [۳]:

- ریزشبکه AC به صورت مستقیم به شبکه AC متصل بوده و نوسانات ولتاژ و فرکانس در شبکه، کیفیت توان ریزشبکه AC را تحت تأثیر قرار می دهد. علاوه بر این، هارمونیک های ناشی از بارهای غیرخطی در ریزشبکه AC، به صورت مستقیم به شبکه اصلی تزریق می شود [۴].
- ریزشبکه AC به صورت مستقیم به شبکه AC متصل بوده و امکان کنترل دقیق توان مبادله ای بین ریزشبکه AC و شبکه اصلی وجود ندارد. تبادل توان بین ریزشبکه DC و شبکه بالادست از طریق ریزشبکه AC انجام می شود که سبب افزایش مراحل تبدیل توان و تلفات انرژی می شود [۵].

در سال های اخیر، تجمع منابع تولید پراکنده بزرگ در ریزشبکه ها و همچنین افزایش نیاز به ریزشبکه های DC ولتاژ متوسط و ولتاژ پایین سبب شده است که ریزشبکه های ترکیبی چندترمیناله بیشتر مورد توجه قرار گیرند. هدف این مقاله، ارائه یک ساختار برای ریزشبکه های ترکیبی AC/DC می باشد به صورتی که بتواند بین ریزشبکه ها و شبکه اصلی ایزولاسیون برقرار کند، امکان کنترل کامل توان بین ریزشبکه ها و شبکه اصلی فراهم شود، هارمونیک های مخرب ریزشبکه ها به شبکه اصلی تزریق نشود، انعطاف پذیری کنترلی بین ریزشبکه ها و شبکه اصلی افزایش یابد و همچنین امکان بهره برداری در حالت متصل به شبکه و جزیره ای را فراهم سازد. علاوه بر این، یک پیکربندی کنترلی مناسبی نیز برای ریزشبکه جدید طراحی می شود تا عملکرد

^۱Distributed Generations^۲Microgrid

پایدار آن در شرایط مختلف تضمین شود. در [۶] از مبدل پشت‌به‌پشت برای کنترل توان بین چند ریزشبه ترکیبی AC/DC استفاده شده است. مبدل پشت‌به‌پشت به ساختاری گفته می‌شود که در آن بخش DC دو اینورتر به یکدیگر متصل می‌شوند. در این کار از کنترل هماهنگ توزیع شده سلسله مراتبی برای کنترل ریزشبه‌های AC و DC استفاده شده است. همچنین یک استراتژی کنترلی داخلی برای اعمال بر روی مبدل‌های پشت‌به‌پشت و تقسیم توان بین ریزشبه‌های ارائه شده است. روش کنترلی پیشنهادی با هدف بهبود کیفیت توان در ریزشبه‌ها طراحی شده است. در [۷] به منظور کاهش تعداد مراحل تبدیل توان و تأمین نیاز به انرژی DC در سطوح ولتاژ مختلف، یک ساختار چهار ترمیناله برای ریزشبه‌های ترکیبی AC/DC پیشنهاد شده است که شامل یک ترمینال AC ولتاژ متوسط، یک ترمینال DC ولتاژ متوسط و دو ترمینال DC ولتاژ پایین می‌باشد. ساختار پیشنهادی شامل یک مبدل چندسطحی ماژولار به عنوان مبدل واسط اصلی بین ترمینال AC ولتاژ متوسط و ترمینال DC ولتاژ متوسط و همچنین یک پل فعال دابل بین ترمینال‌های DC ولتاژ پایین است. در این مقاله همچنین یک روش کنترل انرژی بهبود یافته پیشنهاد شده است که ولتاژ ترمینال‌های DC را تنظیم می‌کند. در مرجع [۸] یک ساختار تجمیع شده و قابل تغییر برای ریزشبه ترکیبی AC/DC و همچنین یک استراتژی کنترلی سلسله مراتبی برای آن پیشنهاد شده است. در این مقاله ابتدا یک ساختار جدید برای مبدل واسط ارائه شده که واحد اتصال هوشمند نامیده می‌شود و می‌تواند اتصال AC/DC چندگانه فراهم سازد. در ادامه نیز یک ساختار کنترلی سلسله مراتبی برای واحد اتصال هوشمند طراحی شده است. در [۹] یک ساختار ساده‌تر و منعطف‌تر برای ریزشبه‌های ترکیبی پیشنهاد شده که شامل یک مبدل واسط با چند پورت خروجی می‌باشد. با استفاده از این ساختار، تعداد مبدل‌های قدرت مورد نیاز در ریزشبه‌های ترکیبی با سطوح ولتاژ DC مختلف، کاهش می‌یابد و در عین حال، انعطاف‌پذیری کنترلی ریزشبه نیز افت نمی‌کند. نویسندگان در مرجع [۱۰] درباره بهبود کیفیت توان در ریزشبه ترکیبی AC/DC بحث کرده‌اند. در این مقاله با استفاده از کنترل مبدل بین دو سمت AC و DC، علاوه بر انتقال توان بین دو ریزشبه، هارمونیک‌های ناشیاز بار غیرخطی در سمت AC نیز کاهش داده می‌شوند. در واقع مبدل و ریزشبه DC، به صورت یک فیلترحقیقی مجازی عمل می‌کنند، که با تولید هارمونیک‌های مکمل بار غیرخطی، کیفیت توان را بهبود می‌دهند. نویسندگان در مرجع [۱۱] ساختار کنترل سلسله مراتبی، شامل سطح کنترل داخلی، اولیه و ثانویه را برای کنترل ریزشبه ترکیبی معرفی کرده‌اند. کنترل داخلی برای تنظیم ولتاژ خروجی اینورتر استفاده می‌شود. کنترل اصلی بر پایه کنترل افتی است. کنترل ثانویه اختلاف ولتاژ ریزشبه که از کنترل اولیه به وجود آمده را جبران می‌کند تا ولتاژ بین ریزشبه و شبکه اصلی کاملاً سنکرون و منطبق باشند. ریزشبه می‌تواند با یک شماتیک کنترلی یکسانی که پیشنهاد شده در دو حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه به خوبی عمل کند. در مرجع [۱۲] یک ساختار اصلاح شده برای مبدل واسط ریزشبه‌های ترکیبی AC/DC ارائه شده است. در ساختار پیشنهادی، از ذخیره‌سازی انرژی در مبدل واسط استفاده می‌شود. همچنین در این مقاله یک استراتژی مدیریت انرژی ارائه شده است که کیفیت توان ریزشبه را بهبود می‌بخشد. مبدل واسط پیشنهادی در این کار شامل دو اینورتر شش کلیده موازی است که یکی از آن‌ها از طریق ترانسفورماتور به شبکه AC و به صورت مستقیم به شبکه DC متصل می‌شود. اینورتر دوم به صورت مستقیم به شبکه AC متصل است ولی پرت DC خروجی آن به یک ذخیره‌ساز متصل بوده و از طریق یک مبدل پل به شبکه DC متصل می‌شود. در [۱۳] به منظور کاهش تعداد مراحل تبدیل توان و تأمین نیاز به انرژی DC در سطوح ولتاژ مختلف، یک ساختار چهار ترمیناله برای ریزشبه‌های ترکیبی AC/DC پیشنهاد شده است که شامل یک ترمینال AC ولتاژ متوسط، یک ترمینال DC ولتاژ متوسط و دو ترمینال DC ولتاژ پایین می‌باشد. ساختار پیشنهادی شامل یک مبدل چندسطحی ماژولار به عنوان مبدل واسط اصلی بین ترمینال AC ولتاژ متوسط و ترمینال DC ولتاژ متوسط و همچنین یک پل فعال دابل بین ترمینال‌های DC ولتاژ پایین است. در این مقاله همچنین یک روش کنترل انرژی بهبود یافته پیشنهاد شده است که ولتاژ ترمینال‌های DC را تنظیم می‌کند. جدول (۱) به مقایسه و بررسی مطالعات انجام گرفته در این زمینه می‌پردازد.

جدول ۱- بررسی ضعفهای مطالعات انجام گرفته

مرجع	ساختار و روش پیشنهادی	ضعفها
[۱۲]	یک ساختار اصلاح شده برای مبدل واسط ریزشبههای ترکیبی AC/DC ارائه شده است که از ذخیره سازی انرژی در مبدل واسط استفاده می شود.	ریزشبکه AC به صورت مستقیم به شبکه AC متصل بوده و نوسانات ولتاژ و فرکانس در شبکه، کیفیت توان ریزشبکه AC را تحت تاثیر قرار می دهد. علاوه بر این، هارمونیک های ناشی از بارهای غیرخطی در ریزشبکه AC، به صورت مستقیم به شبکه اصلی تزریق می شود.
[۴]	از مبدل پشت به پشت برای کنترل توان بین چند ریزشبکه ترکیبی AC/DC استفاده شده است. در این کار از کنترل هماهنگ توزیع شده سلسله مراتبی برای کنترل ریزشبههای AC و DC استفاده شده است.	ریزشبکه AC به صورت مستقیم به شبکه اصلی تزریق می شود.
[۱۳]	یک ساختار چهار ترمیناله برای ریزشبههای ترکیبی AC/DC پیشنهاد شده است که شامل یک ترمینال AC ولتاژ متوسط، یک ترمینال DC ولتاژ متوسط و دو ترمینال DC ولتاژ پایین می باشد. ساختار پیشنهادی شامل یک مبدل چندسطحی مازولار به عنوان مبدل واسط اصلی بین ترمینال AC ولتاژ متوسط و ترمینال DC ولتاژ متوسط و همچنین یک پل فعال دوبل بین ترمینال های DC ولتاژ پایین است.	ریزشبکه AC به صورت مستقیم به شبکه AC متصل بوده و امکان کنترل دقیق توان مبادله ای بین ریزشبکه AC و شبکه اصلی وجود ندارد.
[۸]	یک ساختار تجمیع شده و قابل تغییر برای ریزشبکه ترکیبی AC/DC و همچنین یک استراتژی کنترلی سلسله مراتبی برای آن پیشنهاد شده است. در این کار یک ساختار کنترلی سلسله مراتبی برای واحد اتصال هوشمند طراحی شده است.	تبادل توان بین ریزشبکه DC و شبکه بالادست از طریق ریزشبکه AC انجام می شود که سبب افزایش مراحل تبدیل توان و تلفات انرژی می شود.
[۹]	یک ساختار ساده تر و منعطف تر برای ریزشبه ای ترکیبی پیشنهاد شده که شامل یک مبدل واسط با چند پورت خروجی می باشد.	

بررسی های انجام شده نشان می دهد که هیچ یک از ساختارهای پیشنهادی در مقالات بررسی شده، تمام ضعف های بیان شده را برطرف نمی سازد. در این مقاله یک ساختار جدید برای ریزشبه های ترکیبی AC/DC ارائه می گردد که بین ریزشبه ها و شبکه اصلی ایزولاسیون برقرار می کند، امکان کنترل کامل توان بین ریزشبه ها و شبکه اصلی فراهم می کند، هارمونیک های مخرب بارهای غیرخطی به شبکه اصلی تزریق نمی شود، انعطاف پذیری کنترلی بین ریزشبه ها و شبکه اصلی افزایش می یابد و همچنین امکان بهره برداری در حالت متصل به شبکه و جزیره ای را فراهم می سازد. در بخش اول مقدمه و ساختار مقاله ارائه شد. در بخش دوم ساختار ریزشبه هیبرید و روش کنترلی مبدل ها ارائه می گردد؛ در بخش سوم جبران سازی هارمونیک ها و اعوجاجات بیان می شود؛ در بخش چهارم نتایج شبیه سازی مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد و در نهایت در بخش آخر، نتیجه گیری کلی ارائه می گردد.

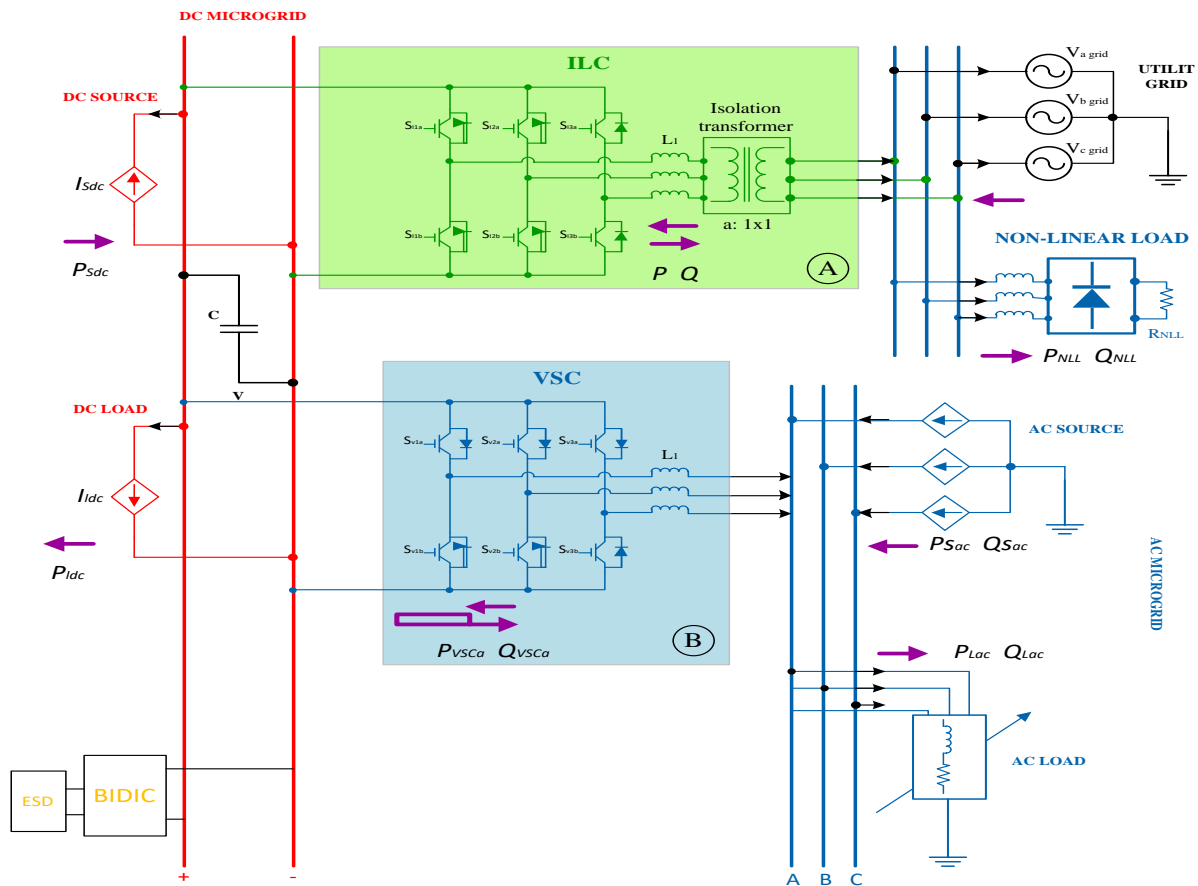
۲. ساختار ریزشبه هیبرید AC/DC و مبدل ها

ساختار ریزشبه هیبریدی AC/DC مورد مطالعه در این مقاله شامل منابع تولید پراکنده، بارهای الکتریکی، ذخیره سازی انرژی و شبکه شهری می باشد. شکل (۱) پیکربندی ریزشبه هیبریدی AC/DC را با عناصر توصیف شده نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، در یک طرف ریزشبه، منبع DC و بارهای DC قرار دارند و در طرف دیگر منبع AC و بارهای AC قرار گرفته اند. همچنین در بخش بارهای AC، بارهای غیرخطی و هارمونیک نیز مدل شده اند. شبکه شهری نیز به ریزشبه متصل شده است و ذخیره ساز انرژی الکتریکی نیز در سیستم حضور دارد. در توپولوژی ریزشبه ترکیبی AC/DC مورد مطالعه در این پژوهش، DG ها از مبدل های تغذیه شبکه استفاده می کنند که به عنوان منابع جریان کنترل شده با MPPT^۳ مورد بررسی قرار می گیرند. مبدل تشکیل دهنده شبکه یک مبدل واسط (ILC)^۴ است که برای کنترل ولتاژ ریزشبه مورد استفاده قرار می گیرد.

^۳ Maximum power point tracking

^۴ Interlinking converter

دو مبدل پشتیبان شبکه برای بهبود اشتراک توان و کاهش اختلالات کیفیت توان استفاده می شود. این مبدل ها به صورت آبشاری به صورت مبدل واسط با دو مرحله عمل می کنند. مدل ILC در قاب dq با معادلات دیفرانسیل زیر تشریح داده شده است:



شکل ۱- ساختار ریز شبکه ترکیبی مورد بررسی در مقاله

۱.۲. مبدل واسط ILC

این مبدل که در شکل (۱) ارائه شده است، مبدل منبع ولتاژ^۵ (VSC) با یک سلف سریم متصل به شبکه سراسری و بار غیرخطی هارمونیک است. ولتاژ لینک DC کنترل می شود که امکان اتصال منابع DC و بارها را فراهم می کند. این رو، ILC مسئول جریان برق بین ریز شبکه های AC و DC است [۱۲]. مدل ILC در قاب dq با معادلات دیفرانسیل زیر توضیح داده شده است:

$$\begin{cases} L_i \frac{d}{dt} i_{id} = v_{id} - R_i i_{id} + L_i \omega_i i_{iq} - v_{sd} \\ L_i \frac{d}{dt} i_{iq} = v_{iq} - R_i i_{iq} + L_i \omega_i i_{id} - v_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

⁵ Voltage Source Converter

$$\frac{C_{DCMG}}{2} \frac{dV_{DC}^2}{dt} = P_{ilcin} - P_{losses} - P_{ilcout} \quad (2)$$

که در آن i_{id} و i_{iq} جریان های محورهای d و q مبدل هستند و v_{id} و v_{iq} ولتاژ محورهای d و q هستند. L_i و R_i اندوکتانس و مقاومت فیلتر L هستند. ω_i فرکانس زاویه ای ILC و v_{sd} و v_{sq} ولتاژ محورهای d و q شبکه قدرت هستند. C_{DCMG} خازن لینک DC است و V_{DC} ولتاژ لینک DC می باشد؛ P_{ilcin} و P_{ilcout} توان ورودی و خروجی مبدل و P_{losses} تلفات مبدل است. با اعمال تبدیل لاپلاس به روابط (۱) و (۲)، تنها با در نظر گرفتن متغیرهای حالت، می توان چنین نوشت:

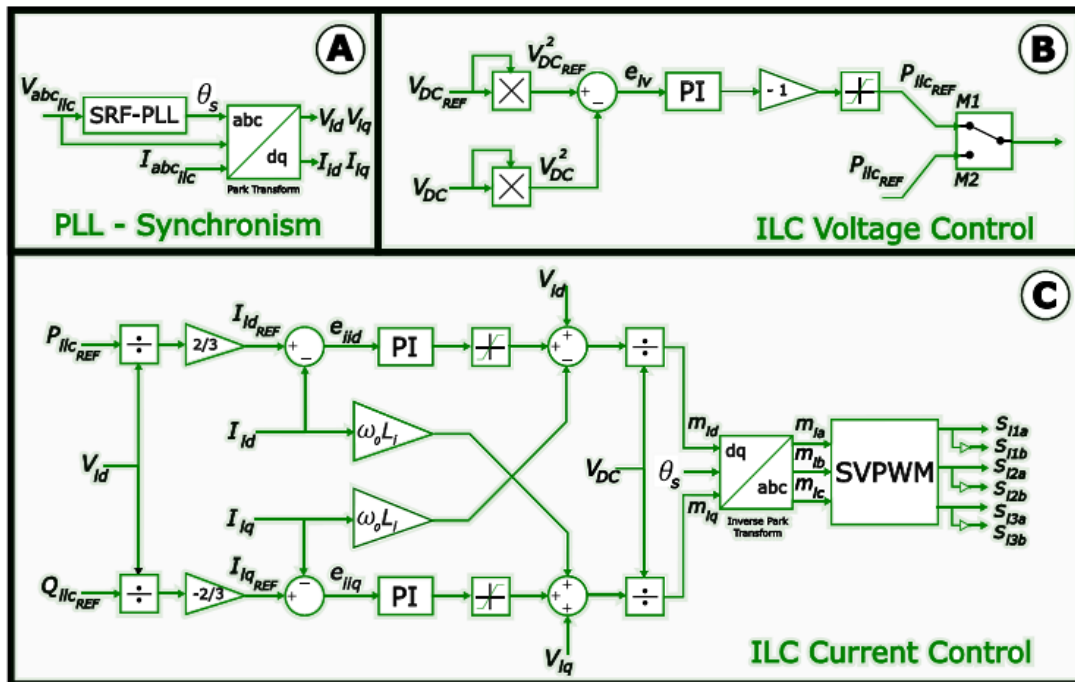
$$G_{cile}(s) = \frac{I_{id}}{m_{id}} = \frac{I_{iq}}{m_{iq}} = \frac{1}{L_i s + R_i} \quad (3)$$

$$G_{vile}(s) = \frac{V_{dc}^2}{P_{REF_{ile}}} = \frac{2}{C_{DCMG} s_i} \quad (4)$$

که در آن m_{id} و m_{iq} شاخص های مدولاسیون ILC در قاب مرجع dq هستند و P_{refile} توان مرجع ILC است.

۲.۲. مبدل VSC

همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، این مبدل بین لینک DC (شامل ریزشبه DC و باتری) و ریزشبه AC قرار می گیرد. مدل سازی VSC همانند ILC است، زیرا هر دو واحد مبدل های منبع ولتاژ با فیلترهای L هستند [۱۲]. ILC مبدلی است که جریان الکتریکی دو طرفه را بین ریزشبه DC و AC متصل می کند. دو حلقه کنترل برای هدایت ILC استفاده می شود. حلقه داخلی، جریان در فیلتر L را کنترل می کند، درحالی که حلقه بیرونی، ولتاژ خازن های لینک DC را کنترل می کند. استراتژی کنترل ILC در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲- ساختار سیستم کنترلی مربوط به مبدل ILC

جزئیات A از شکل (۲) تبدیل پارک را با PLL مورد استفاده برای سنکرون سازی ILC با شبکه نشان می دهد. برای این کار، ولتاژها و جریان های سه فاز اندازه گیری شده در PCC به عنوان ورودی تبدیل پارک استفاده می شود، که به زاویه سنکرون نیاز دارد که توسط $SRF\text{-}PLL^7$ تولید می شود. کنترل ولتاژ، که در جزئیات B از شکل (۲) نشان داده شده است، تفاوت بین مجذور ولتاژ مرجع و ولتاژ اندازه گیری شده در لینک DC را می گیرد و اختلاف آن به عنوان ورودی کنترل کننده PI^8 تولید می گردد. هنگامی که ILC در حالت M1 کار می کند، حلقه ولتاژ مرجع، توان مرجع را برای حلقه جریان تولید می کند و لیدر حالت M2، توان مرجع مستقیماً بدون کنترل ولتاژ در نظر گرفته می شود. از توان اکتیو و راکتیو مرجع، جریان مرجع به ترتیب برای محور dq با توجه به روابط زیر به دست می آید:

$$I_{dREF} = \frac{2}{3} \frac{P_{REF}}{V_d} \quad (5)$$

$$I_{qREF} = -\frac{2}{3} \frac{Q_{REF}}{V_d} \quad (6)$$

که در آن I_{dREF} و I_{qREF} به ترتیب جریان مرجع dq و P_{REF} و Q_{REF} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو مرجع هستند. این معادلات برای هر دو مبدل ILC و VSC یکسان است. کنترل کننده جریان ILC در بخش C شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر جریان های مرجع در قاب dq با استفاده از توان های اکتیو و راکتیو مرجع محاسبه شده و با استفاده از کنترل کننده های PI، شاخص های مدولاسیون تولید می شوند. سپس این شاخص های مدولاسیون در قاب مرجع dq، شاخص های مدولاسیون در قاب abc را تولید می کنند که ورودی های $SVPWM^9$ می باشند و پالس های سوئیچ زنی ILC را تولید می کنند. لازم به ذکر می باشد که هدف استراتژی کنترل ILC جبران توان راکتیو شبکه و اشتراک توان اکتیو با تکنیک دروپ کنترل^{۱۰} است. کنترل دروپ شامل یک کنترلر دروپ-فرکانس و یک کنترلر دروپ-ولتاژ است. با کنترل دروپ، توان خروجی ژنراتور بر طبق مشخصه های دروپ از پیش تعیین شده تنظیم می شوند. در این استراتژی کنترل دو ضریب بهره دروپ که به ترتیب مقدار تغییرات دروپ زاویه ولتاژ در برابر تغییرات توان خروجی اکتیو و تغییرات دروپ اندازه ولتاژ در برابر تغییرات توان خروجی راکتیو را نشان می دهند، تعریف می گردد.

۳.۲. بخش کنترلی مربوط به مبدل VSC

VSC، یک مبدل قدرت است که ریزشبه AC را به ذخیره ساز (ESD)^{۱۱} و ریزشبه DC متصل می کند، بنابراین به عنوان یک واحد پشتیبانی شبکه عمل می کند. VSC توان اکتیو و راکتیو را مستقیماً کنترل می کند. شکل (۳) بلوک دیاگرام بخش کنترلی مربوط به مبدل VSC را نشان می دهد [۱۳].

⁶ Phase-Locked Loop

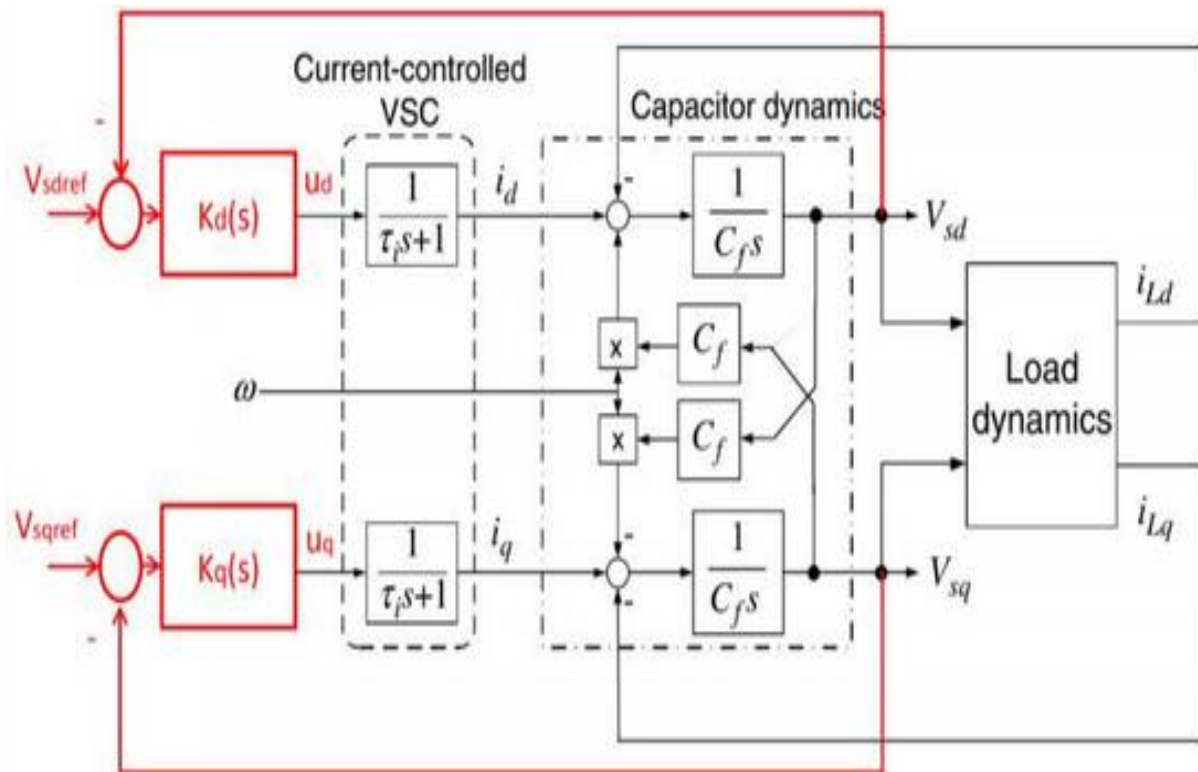
⁷ Synchronous reference frame phase-locked loop

⁸ Proportional Integral

⁹ Space Vector Pulse Width Modulation

¹⁰ Droop control

¹¹ Energy storage device



شکل ۳- بلوک دیاگرام بخش کنترلی مبدل VSC

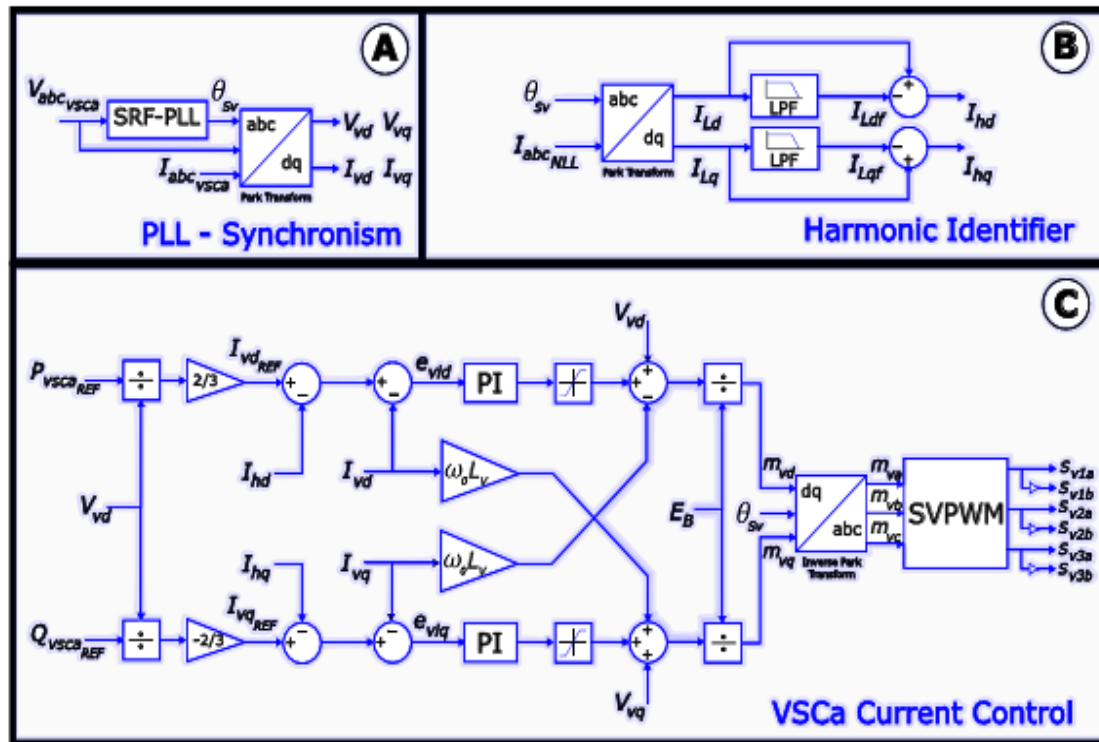
مطابق شکل (۳)، این مبدل که از نوع گرید فیدینگ^{۱۲} می باشد به منظور تنظیم توان حقیقی و راکتیو برای برآورده کردن نیازمندی های توزیع توان و جبران تغییرات بار و نوسانات پخش توان فیدر به کار رفته است.

۳. جبران سازی هارمونیک ها و اعوجاج

اجزای هارمونیک موجود در جریان الکتریکی بارهای غیرخطی مسئول اعوجاج شکل موج شبکه سراسری برق هستند. این تغییر شکل، ضریب توان را کاهش می دهد و می تواند به بارهای الکتریکی آسیب برساند. در این مقاله یک تکنیک کاهش هارمونیک در HMG^{۱۳} برای جلوگیری از چنین مشکلاتی استفاده می شود. ILC مبدل پشتیبانی است که محتوای هارمونیک را جبران می کند. برای این کار، همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، یک بخش شناسایی هارمونیک در استراتژی کنترل مبدل استفاده می شود.

¹²grid-feeding

¹³ hybrid AC/DC microgrids



شکل ۴- ساختار بخش کنترلی مربوط به جبران ساز هارمونیک سیستم ریز شبکه

شناسه هارمونیک بر روی بار غیرخطی اعمال می شود که به زاویه سنکرون نیاز دارد، همان طور که در جزئیات B شکل (۴) ارائه شده است که از تبدیل پارک برای به دست آوردن جریان بار غیرخطی در قاب dq استفاده می کند. یک فیلتر پایین گذر مرتبه دوم (LPF)¹⁴ استفاده می شود که جزء اصلی جریان را از محتوای هارمونیک آن جدا می کند و بنابراین، جریان های جبران سازی هارمونیک به صورت زیر محاسبه می شود [۱۲]:

$$I_{hd} = I_{Ld} - I_{Ldf} \quad (7)$$

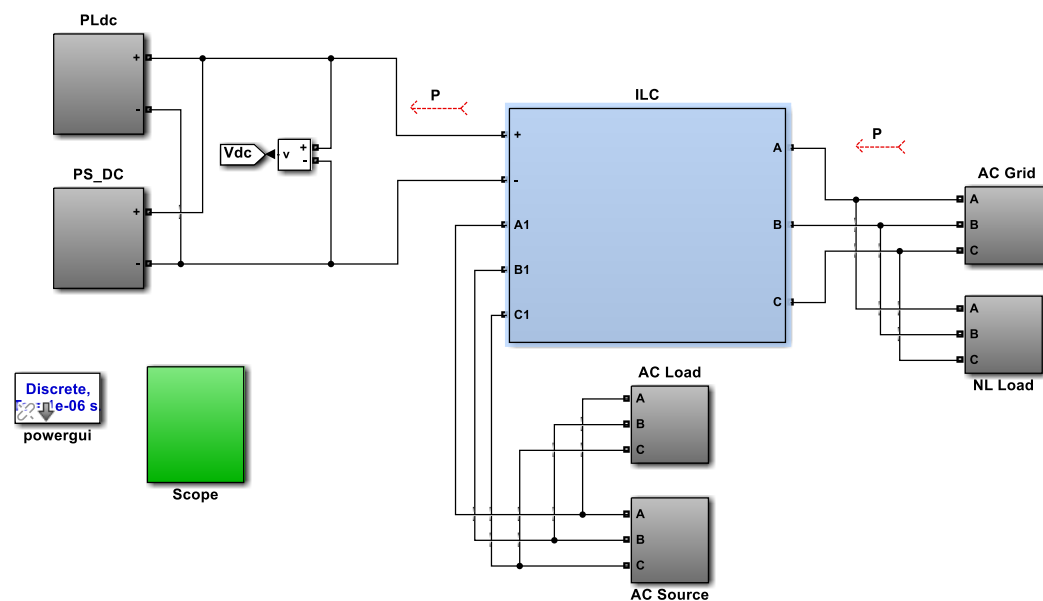
$$I_{hq} = I_{Lq} - I_{Lqf} \quad (8)$$

که در آن I_{hd} و I_{hq} جریان های جبرانی هارمونیک، I_{Ld} و I_{Lq} جریان های غیرخطی و I_{Ldf} و I_{Lqf} جریان های غیرخطی مرتبه اول شکل موج در قاب dq هستند.

۴. نتایج شبیه سازی

شکل (۵) ساختار کلی سیستم شبیه سازی در این مقاله را نشان می دهد. مطابق شکل زیر، سیستم شامل بارهای AC و DC، منابع AC و DC، ذخیره ساز انرژی الکتریکی و مبدل های واسط می باشد. پارامترهای سیستم شبیه سازی در این مقاله در جدول (۲) آورده شده است.

¹⁴low-pass filter



شکل ۵- ساختار کلی سیستم شبیه سازی شده

جدول ۲- پارامترهای شبیه سازی [۱۲]

پارامتر	مقدار
پارامتر مبدل ها	
$C_{DCMG} (\mu f)$	۲۲۵۰
$C_{BESS} (\mu f)$	۱۱۲۵
$L_i (mh)$	۵
$L_v (mh)$	۱۰
$L_b (mh)$	۱۰
$R_{int} (\Omega)$	۰.۱
مقادیر نامی	
$f_n (hz)$	۵۰
$V_{dc_{ref}} (v)$	۹۰۰
$V_{n_{rms}} (v)$	۲۲۰

$P_n(w)$	۴۵۰۰
ذخیره ساز انرژی الکتریکی	
$E_{ob}(v)$	۳.۳۶۶
$R_{bat}(\Omega)$	۰.۰۱
SOC_0	۰.۵
پارامترهای سیستم کنترلی تناسبی	
K_{pi_ilc}	۱۳.۵۰
K_{ii_ilc}	۱۳۲۳۸
K_{pi_vsca}	۱۶۰
K_{ii_vsca}	۶۱۴۵
K_{pi_bidic}	۱۷.۳۲
K_{ii_bidic}	۲۰۰۰
K_{pv_ilc}	۰.۱۵
K_{iv_ilc}	۱۲.۴۰
K_{pv_bidic}	۰.۱
K_{iv_bidic}	۰.۲۵۵

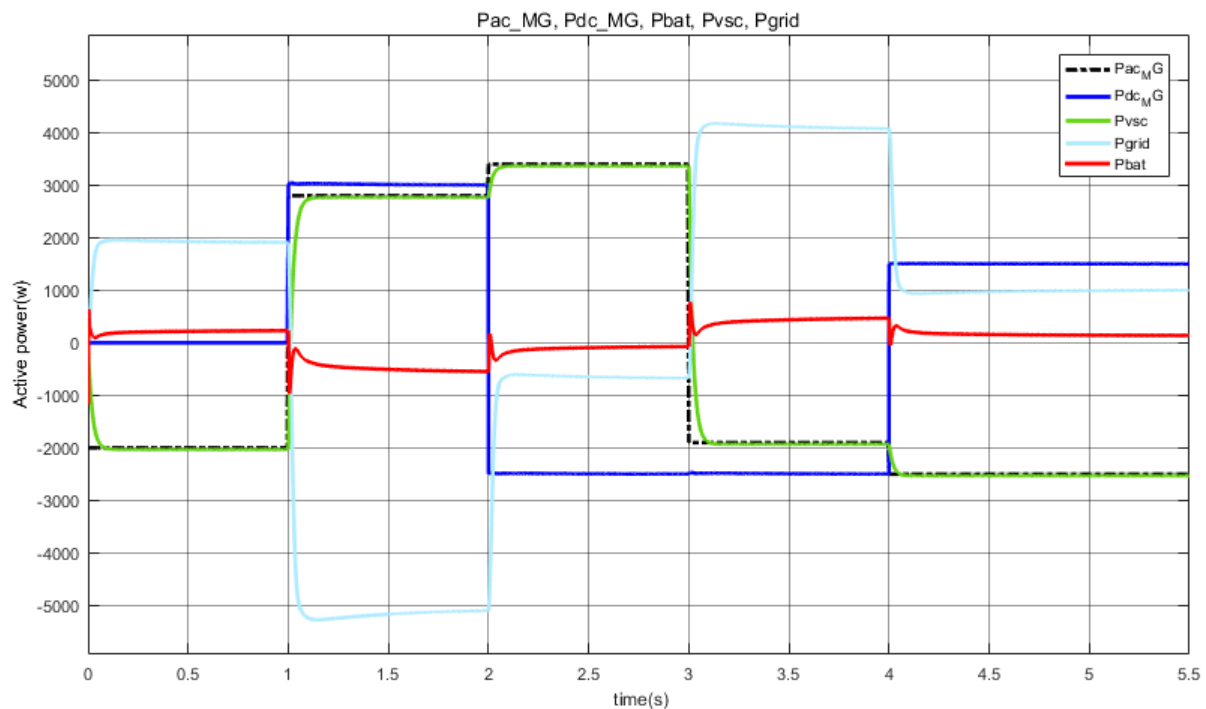
برای بررسی نتایج شبیه سازی، مقادیر بارها و توان ریز شبکه در حالت های مختلف تغییر می کند تا عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گیرد که این تغییرات در قالب چهار سناریو مطابق جدول (۳) می باشد.

جدول ۳- شرایط عملکرد منابع و بارها در زمان های مختلف

سناریو	۱	۲	۳	۴
محدوده زمانی (s)	۲-۱	۳-۲	۴-۳	۵-۴

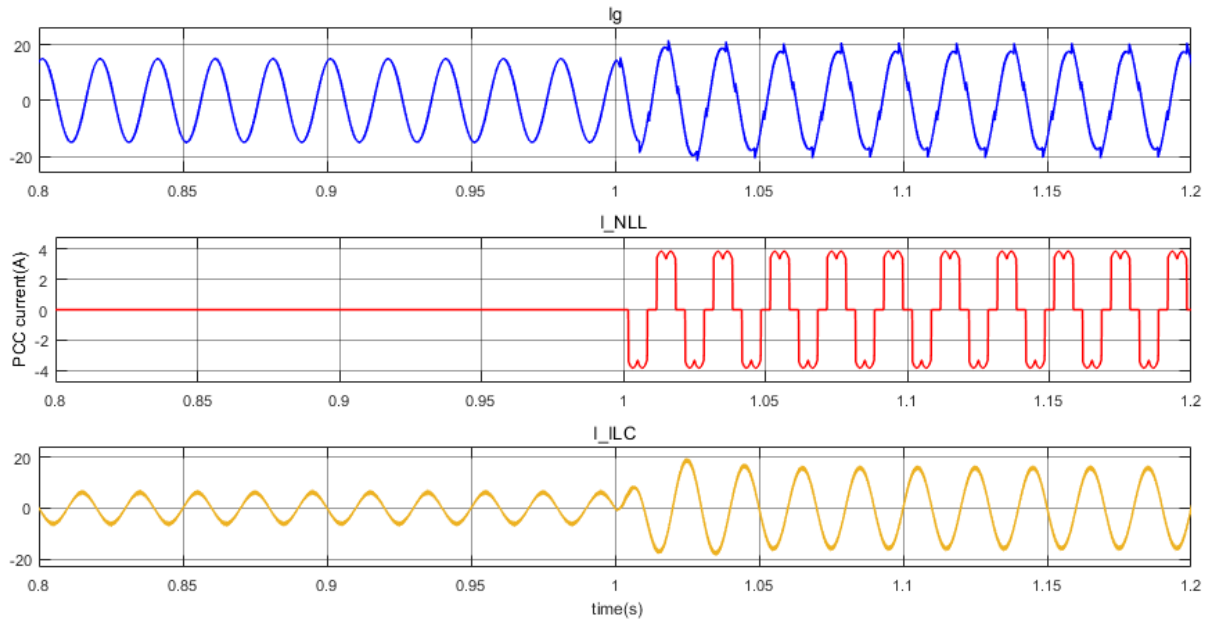
شرایط	$P_{ACMG} > 0$	$P_{ACMG} > 0$	$P_{ACMG} < 0$	$P_{ACMG} < 0$
	$P_{DCMG} > 0$	$P_{DCMG} < 0$	$P_{DCMG} < 0$	$P_{DCMG} > 0$

برای بررسی نتایج شبیه سازی مربوط به ریزشبه ترکیبی AC/DC پیشنهادی، سناریوهای مربوط به جدول (۲) بر روی سیستم اعمال می شود. شکل (۶) منحنی توان ریزشبه AC، DC، شبکه و ذخیره ساز برای سناریوهای مختلف را نشان می دهد.



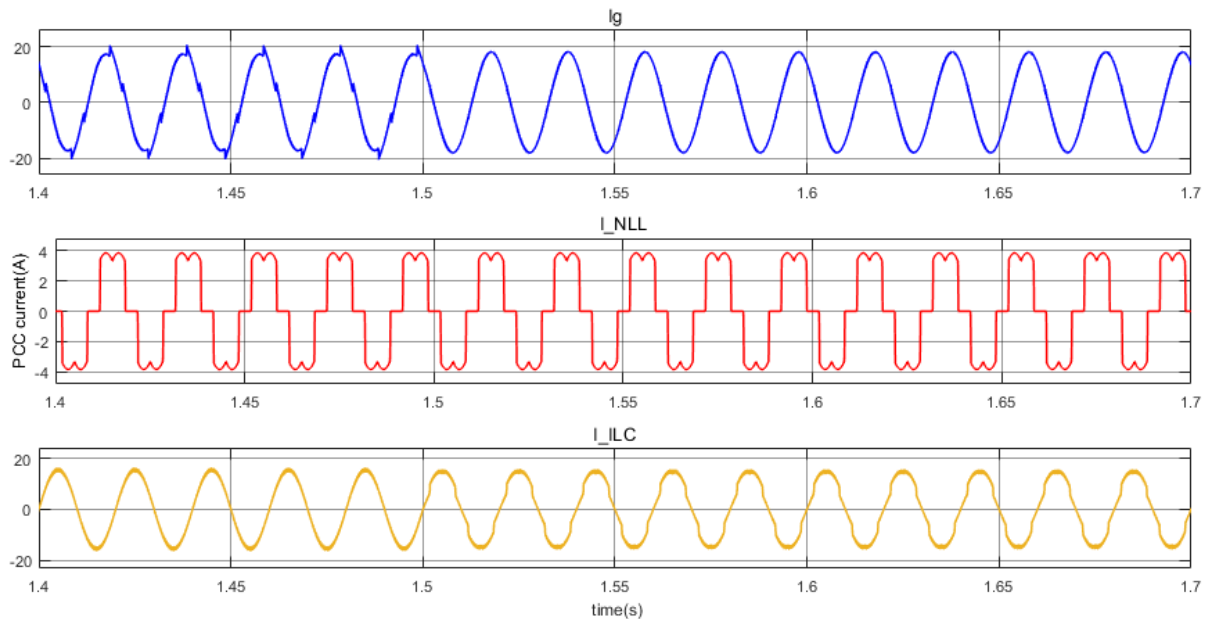
شکل ۶- منحنی توان اکتیو ریز شبکه AC/DC، شبکه و ذخیره ساز

همان گونه که مشاهده می شود، در ثانیه ۰ تا ۱، کل توان شبکه از طریق مبدل VSC مربوط به ریزشبه AC، به سمت ریزشبه AC منتقل می شود. در این حالت ریز شبکه AC مصرف کننده توان می باشد و مقدار آن منفی ۲ کیلووات می باشد. در ثانیه ۱ تا ۲ ریزشبه های DC و AC تولید کننده توان هستند و شبکه اصلی را تغذیه می کنند؛ در این حالت توان مازاد در ذخیره ساز، ذخیره می گردد. در ثانیه ۲ تا ۳ ریزشبه AC از طریق مبدل VSC، به تغذیه شبکه اصلی و ریزشبه DC می پردازد. در واقع در این حالت ریزشبه DC نیز کمبود توان دارد. در ثانیه ۳ تا ۴، هر دو ریزشبه های DC و AC کمبود توان دارند و از طریق شبکه اصلی این توان جبران می شود. لازم به ذکر می باشد که مقداری از این توان از طریق دشارژ شدن باتری تأمین می گردد. در ثانیه ۴ تا ۵، ریزشبه AC کمبود توان دارد که این توان از طریق شبکه اصلی و ریزشبه DC تأمین می گردد. در این حالت باتری در حالت دشارژ می باشد. شکل (۷) منحنی جریان شبکه، بار غیرخطی و مبدل واسط ILC در زمان ورود بار غیرخطی در ثانیه ۱ را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، تا قبل از ورود بار غیرخطی به سیستم، منحنی جریان شبکه کاملاً سینوسی و بدون اعوجاج می باشد، اما با ورود بار غیرخطی، منحنی اعوجاجی می شود.



شکل ۷- منحنی جریان شبکه، بار غیرخطی و مبدل واسط ILC در زمان ورود بار غیرخطی

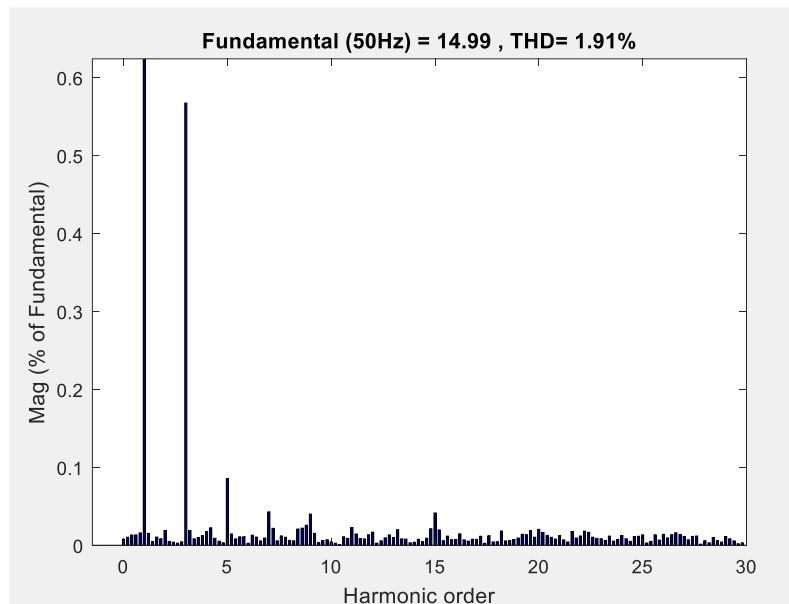
شکل (۸) منحنی جریان شبکه، بار غیرخطی و مبدل واسط ILC در زمان عملکرد بخش کنترلی هارمونیک را در ثانیه ۱.۵ نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سیستم کنترلی به‌خوبی در ثانیه ۱.۵ به بعد عمل می‌کند و منحنی جریان شبکه بدون اعوجاج می‌شود.



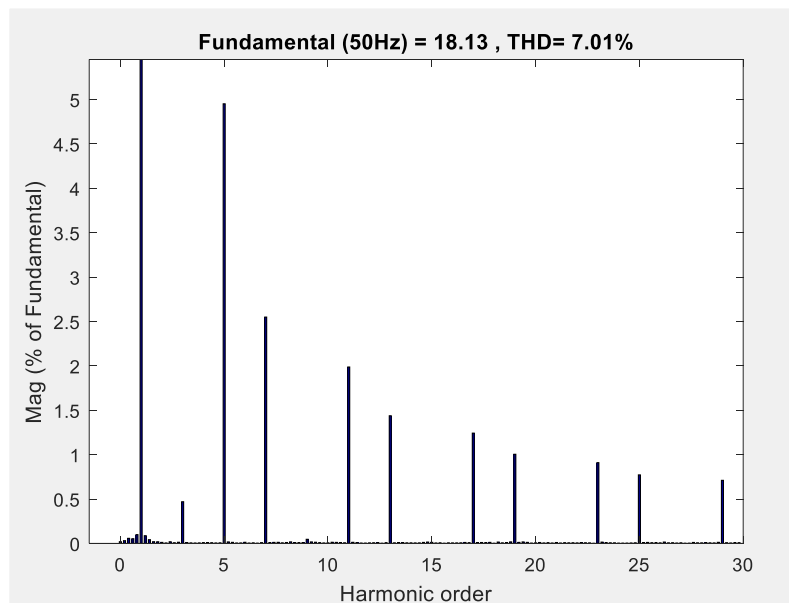
شکل ۸- منحنی جریان شبکه، بار غیرخطی و مبدل واسط ILC در زمان عملکرد بخش کنترلی هارمونیک را

لازم به ذکر می‌باشد که جبران هارمونیک از طریق مبدل ILC صورت می‌گیرد و به همین دلیل پس از ثانیه ۱.۵ منحنی جریان مبدل واسط ILC دچار هارمونیک می‌شود تا منحنی جریان شبکه هارمونیکی نباشد. برای بررسی میزان اعوجاج از تحلیل FFT موجود در متلب برای محاسبه میزان THD استفاده می‌شود. شکل (۹) میزان هارمونیک و اعوجاج جریان شبکه در هنگامی که بار غیرخطی در شبکه موجود نیست را نشان می‌دهد که مقدار THD، ۱.۹۱٪ می‌باشد که مقدار آن کم و قابل قبول است. در ثانیه ۱، بار هارمونیکی و غیرخطی به سیستم وارد می‌شود؛ شکل (۱۰) میزان هارمونیک و اعوجاج جریان شبکه

در هنگام ورود بار غیرخطی و هارمونیک را نشان می‌دهد که در این حالت میزان THD مربوط به جریان شبکه ۰.۷٪ می‌شود که بالاتر از مقدار استاندارد (معمولاً ۵٪) می‌باشد. بنابراین لازم است تا میزان اعوجاج را کاهش داد.

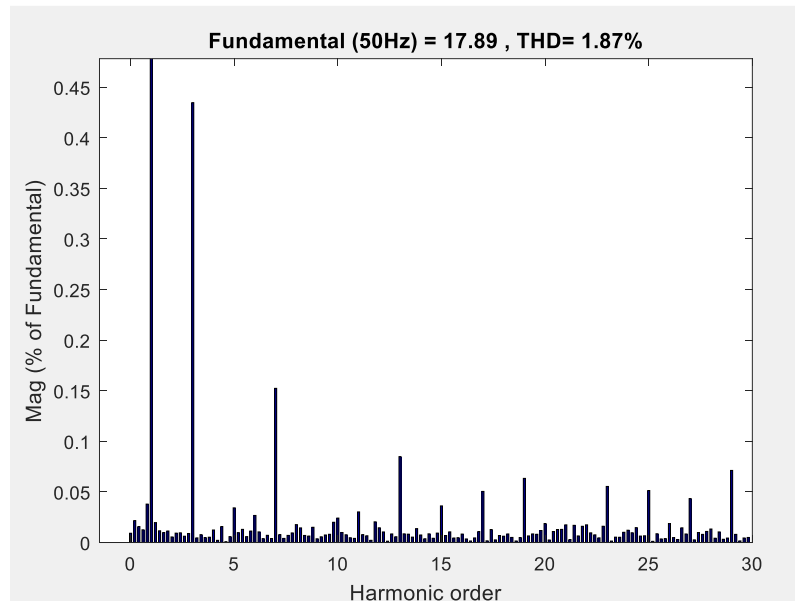


شکل ۹- میزان هارمونیک و اعوجاج جریان شبکه در هنگامی که بار غیرخطی در شبکه موجود نیست



شکل ۱۰- میزان هارمونیک و اعوجاج جریان شبکه در هنگام ورود بار غیرخطی و هارمونیک

پس از عملکرد بخش کنترلی مربوط به جبران سازی هارمونیک در ریزشکبه ترکیبی AC/DC، میزان THD به مقدار اولیه و حتی کمتر از آن می‌رسد. شکل (۱۱) میزان هارمونیک و اعوجاج جریان شبکه در هنگام عملکرد بخش کنترلی و جبران ساز هارمونیک را نشان می‌دهد که میزان THD در حدود ۱.۸۷٪ بوده و حتی از مقدار اولیه کمتر می‌باشد.



شکل ۱۱- میزان هارمونیک و اعوجاج جریان شبکه در هنگام عملکرد بخش کنترلی و جبران ساز هارمونیکی

بنابراین سیستم مدیریت انرژی و کنترل توان و همچنین بخشی از سیستم که هدفش بهبود کیفیت توان و کاهش هارمونیک در ریزشبه ترکیبی AC/DC می باشد در تمامی شرایط به خوبی عمل کرده است و بنابراین ساختار پیشنهادی در این مقاله دارای عملکرد بسیار خوبی می باشد.

۵. نتیجه گیری

ریزشبکه های AC/DC ترکیبی برای ارتباط بهتر منابع DG مختلف با شبکه قدرت و استخراج و بهره برداری از ویژگی های ریزشبه AC و ریزشبه DC برنامه ریزی شده اند. ارتباط این ریزشبه ها به یک مبدل واسط با طرح مدیریت و کنترل توان مناسبی نیاز دارد، لذا سیستم قدرت باید قادر به تقسیم توان مورد نیاز میان منابع تولید پراکنده AC و DC موجود متناسب با ظرفیت نامی آن ها باشد. به عبارت دیگر، به منظور تنظیم فرکانس و ولتاژ در ریزشبه AC، تنظیم ولتاژ در ریزشبه DC و مدیریت و کنترل توان متناسب با ظرفیت توان هر ریزشبه، ارائه یک روش مدیریت توان مناسب در ریزشبه AC/DC هیبرید الزامی و ضروری می باشد. با توجه به این موضوع، در این مقاله یک ساختار جدید و همچنین یک استراتژی کنترلی مناسب برای ریزشبه های ترکیبی AC/DC، ارائه شد. همچنین یک روش کنترل توان هماهنگ جهت تقسیم توان میان مبدل های الکترونیک قدرت و یک روش کنترل مشارکتی توزیع شده جهت کنترل ولتاژ و فرکانس در ریزشبه AC و کنترل ولتاژ و جریان در ریزشبه DC برای ریزشبه AC/DC هیبرید ارائه گردید. در توپولوژی ریزشبه ترکیبی AC/DC مورد مطالعه در این پژوهش، DG ها از مبدل های تغذیه شبکه استفاده می کنند. مبدل تشکیل دهنده شبکه یک مبدل واسط (ILC) است که برای کنترل ولتاژ ریزشبه مورد استفاده قرار می گیرد. دو مبدل پشتیبان شبکه برای بهبود اشتراک توان و کاهش اختلالات کیفیت توان استفاده می شود. این مبدل ها به صورت آبشاری به صورت مبدل واسط با دو مرحله عمل می کنند. به طور کلی نتایج نشان می دهد که سیستم مدیریت انرژی و کنترل توان و همچنین بخشی از سیستم که هدفش بهبود کیفیت توان و کاهش هارمونیک در ریزشبه ترکیبی AC/DC می باشد در تمامی شرایط به خوبی عملکرد کرده است و بنابراین ساختار پیشنهادی در این مقاله دارای عملکرد بسیار خوبی می باشد.

۶. منابع

1. Eidiani, M. and M. Kargar.(2022) "*Frequency and voltage stability of the microgrid with the penetration of renewable sources*". 9th Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG), IEEE.
2. Muchande, S. and S. Thale,(2022) "*Hierarchical Control of a Low Voltage DC Microgrid with Coordinated Power Management Strategies*." Engineering, Technology & Applied Science Research, 12(1): p. 8045-8052.
3. Aldosary, A., et al.,(2021) "*Energy management strategy based on short-term resource scheduling of a renewable energy-based microgrid in the presence of electric vehicles using θ -modified krill herd algorithm*." Neural Computing and Applications, 33: p. 10005-10020.
4. Jena, S. and N.P. Padhy.(2020) "*Distributed cooperative control for autonomous hybrid AC/DC microgrid clusters interconnected via back-to-back converter control*." IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), IEEE.
5. Li, Z., et al.(2019) "*Hierarchical control of parallel voltage source inverters in AC microgrids*." The Journal of Engineering, (16): p. 1149-1152.
6. Hou, X., et al.(2018) "*Distributed hierarchical control of AC microgrid operating in grid-connected, islanded and their transition modes*". Ieee Access, 6: p. 77388-77401.
7. Xiao, Q., et al.(2021) "*Modular multilevel converter based multi-terminal hybrid AC/DC microgrid with improved energy control method*." Applied Energy, 282: p. 116154.
8. Yu, H., et al.(2020) "*An integrated and reconfigurable hybrid AC/DC microgrid architecture with autonomous power flow control for nearly/net zero energy buildings*". Applied Energy, 263: p. 114610.
9. Khodabakhsh, J. and G. Moschopoulos, *Simplified hybrid AC–DC microgrid with a novel interlinking converter*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020. 56(5) : (p. 5023-5034.
10. Khederzadeh, M. and M. Sadeghi,(2016) "*Virtual active power filter: a notable feature for hybrid ac/dc microgrids*". IET Generation, Transmission & Distribution, 10(14): p. 3539-3546.
11. Ziouani, I., et al.(2018) "*Hierarchical control for flexible microgrid based on three-phase voltage source inverters operated in parallel*". International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 95: p. 188-201.
12. Silveira, J.P.C., et al.(2021) "*Power management of energy storage system with modified interlinking converters topology in hybrid AC/DC microgrid*". International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 130: p. 106880.
13. Xiao, H., et al.(2020) "*An improved control method for multiple bidirectional power converters in hybrid AC/DC microgrid*". IEEE Transactions on Smart Grid, 7(1): p. 340-347

Improving Power Quality and Reducing Harmonics in Hybrid Microgrid using Interlinking Converter

Ehsan Akbari

Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology,
Babol, Iran.

e.akbari@ustmb.ac.ir

Abstract: Today, renewable resources have become important due to the reduction of pollution and cost compared to fossil fuels. Microgrid structure is used for better management and efficiency of these resources. In this article, improving power quality and reducing harmonics in hybrid microgrids using Interlinking converters (ILC) are discussed. For this purpose, a network backup converter has been used to improve power and reduce disturbances. The desired microgrid components include distributed generation units, AC loads, DC loads, the energy storage system (battery), and parallel connecting converters. In the hybrid AC/DC microgrid topology that is investigated in this article, there are two main converters, one is the network forming converter which is an intermediate converter and is used to control the microgrid voltage. The second converter is the VSC converter, which is placed between the DC link (including the DC microgrid and battery) and the AC micro-grid. The control system of a hybrid microgrid was implemented and simulations were carried out in MATLAB software for four different scenarios related to the active and reactive power of the microgrid. After the operation of the harmonic compensation control part in the microgrid, the THD is about 1.87% and even lower than the initial.

Keywords: Power Quality, Harmonic Reduction, Microgrid, Interlinking Converter.