

# طراحی و تحلیل عملکرد مقاوم سیستم بهساز تزریق توان پیل سوختی متصل به شبکه ضعیف با استفاده از شکل‌دهی امپدانس‌های مجازی

## رسول اکبری<sup>۱</sup>، مجید حسین پور<sup>۲\*</sup>، الهام سیفی<sup>۳</sup>، مهدی شاهپرستی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

\*۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۴- استادیار، دانشکده فناوری و نوآوری، دانشگاه واسا، واسا، فنلاند

ایمیل نویسنده مسئول: hoseinpour.majid@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

### چکیده

اینورترهای متصل به شبکه تجهیزات موثر در انتقال توان سیستم‌های تولید پراکنده و منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه می‌باشند. هارمونیک‌های جریان تولید شده ناشی از ریبیل در لینک DC و کلیدزنی فرکانس بالا از جمله معایب اینورترهای متصل به شبکه هستند که با استفاده از فیلترهای مختلف از جمله فیلتر LCL کاهش می‌یابند. در کنار تشدید ذاتی فیلتر LCL، شبکه ضعیف با امپدانس شبکه متغیر منجر به ناپایداری سیستم انتقال توان می‌شود. در نتیجه، میراسازی مناسب برای حذف تشدید در فیلتر LCL و عملکرد انفعالی سیستم تزریق توان حائز اهمیت می‌باشد. هدف این مقاله، بهبود کیفیت توان تزریقی پیل سوختی متصل به شبکه مبتنی بر فیلتر LCL با استفاده از صرفاً یک سنسور جریان و بهبود پایداری و عملکرد انفعالی آن با استفاده از شکل‌دهی امپدانس‌های مجازی است. برای این منظور امپدانس خروجی سیستم بهساز توان پیل سوختی به دو بخش فعال و پسیو تجزیه شده و بخش فعال با استفاده از امپدانس مجازی سری خنثی شده است. برای کاهش اثرات نامطلوب بکارگیری امپدانس مجازی سری، امپدانس مجازی موازی نیز بکار گرفته شده است. جزئیات روند طراحی امپدانس مجازی سری و موازی ارائه شده و حساسیت سیستم تحلیل شده است. نهایتاً، شبیه‌سازی در نرم افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است که نتایج حاصله عملکرد صحیح و دقیق سیستم کنترلی در تزریق توان پیل سوختی به شبکه و کیفیت بسیار مطلوب جریان تزریقی به شبکه همراه با قابلیت حفظ پایداری در شبکه ضعیف نشان می‌دهد.

### کلمات کلیدی

"پیل سوختی"، "اینورتر متصل به شبکه"، "امپدانس‌های مجازی"، "فیلتر LCL"

### ۱- مقدمه

فقط اجازه می‌دهد تا یون‌های هیدروژن مثبت از آند به کاتد منتقل شوند و اجازه انتقال یون‌های منفی را نمی‌دهند. انتقال الکترون از طریق یک بار خارجی انجام می‌شود که باعث تولید برق DC می‌شود (Zhou, ۲۰۲۲). سطح ولتاژ تولیدی پیل سوختی جهت کاربردهای متصل به شبکه، پایین است. بنابراین جهت افزایش سطح ولتاژ خروجی پیل سوختی از مبدل DC-DC استفاده می‌شود. همچنین به جهت اتصال پیل سوختی به شبکه از مبدل DC-AC استفاده می‌شود. در کاربردهای عملی، اینورتر متصل به شبکه نوع LCL به دلیل توانایی تضعیف هارمونیک بهتر و حجم کمتر به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، اینورتر هنگام اتصال به شبکه‌های ضعیف نسبت به امپدانس شبکه حساس یا حتی آسیب‌پذیر است و ممکن است پیک رزونانس رخ دهد (He, ۲۰۲۰). برای میرایی رزونانس، راه حل‌های میرایی غیرفعال و فعال مختلفی پیشنهاد شده است. از آنجایی که میرایی غیرفعال تلفات توان اضافی را به همراه دارد، میرایی فعال ترجیح داده می‌شود (He, ۲۰۲۱). در میان راه‌کارهای میرایی فعال، فیدبک جریان خازن به دلیل سادگی و کارایی آن به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Zhang, ۲۰۲۰). اخیراً مطالعات متعددی (Zou, ۲۰۱۴) توجه ویژه‌ای به کنترل جریان تزریقی به شبکه با استفاده از تنها یک فیدبک جریان برای کاهش تعداد سنسورها داشته‌اند. کنترل جریان شبکه تک حلقه‌ای با لحاظ تاخیر محاسباتی و کنترل جریان اینورتر با فیلتر ناچ از جمله روش‌های ارائه شده مبتنی بر یک سنسور جریان است (Yao, ۲۰۱۶). در کنترل جریان شبکه تک

کاهش سریع ذخایر سوختی و اثرات مضر سوزاندن سوخت‌های فسیلی غیر قابل چشم پوشی می‌باشد. این واقعیت که سوخت‌های فسیلی باعث نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، اثرات جوی و سلامت عمومی می‌شوند، سبب شده توجه محققان را جهت جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر، که پایدار، سازگار با محیط‌زیست و پاک هستند، جلب کند. منابع انرژی تجدیدپذیر شامل: توربین‌های بادی، زمین گرمایی، پیل‌های سوختی، ... می‌باشند. از میان منابع تجدیدپذیر پیل‌های سوختی به دلیل استفاده ساده، قابلیت اطمینان بالا، هزینه تعمیر و نگهداری کم، بی صدا بودن، ... گزینه مناسبی برای کاربردهای مختلف می‌باشد (Yuan, ۲۰۲۰). پیل‌های سوختی تجهیزاتی هستند که از یک فرآیند الکتروشیمیایی برای تبدیل انرژی شیمیایی یک سوخت به انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند. این انرژی الکتریکی قابل استفاده برای وسایل نقلیه، وسایل الکترونیکی، خانه‌ها بوده و یا قابل انتقال به شبکه الکتریکی می‌باشد. بر خلاف باتری که انرژی خود را ذخیره می‌کند، پیل سوختی انرژی شیمیایی سوخت ورودی خود را بدون استفاده از مواد ذخیره شده در ساختار خود به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند (Xun, ۲۰۲۰). پیل سوختی از دو قطب الکتریکی به نام الکترود، الکترولیت و کاتالیست تشکیل شده است. گاز هیدروژن وارد الکترود آند می‌شود و با واکنش اکسیداسیون به یک یون هیدروژن مثبت ( $H^+$ ) و یک الکترون با بار منفی ( $e^-$ ) یونیزه می‌شود. الکترولیت پیل سوختی

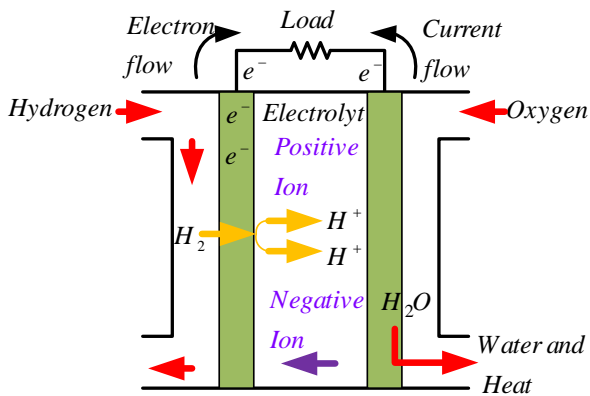
مرجع (Zhao, ۲۰۲۲) از یک کنترل کننده تناسبی همراه با فیلتر میان گذر استفاده شده است. از فیدبک ولتاژ خازن نیز برای بهبود عملکرد انفعالی اینورتر متصل به شبکه با فیلتر LCL استفاده شده است که برای تابع تبدیل مسیر فیدبک از یک فیلتر پایین گذر (Xie, ۲۰۲۰, Xie, ۲۰۲۲) یا از یک کنترل کننده PI (Yang, ۲۰۲۱) یا یک مشتق گیر خالص (Rodriguez, ۲۰۱۹) یا یک فیلتر بالا گذر (Hans, ۲۰۱۹) استفاده شده است. در غالب روش های ارائه شده پیشین، ابتدا یک روش کنترلی مشخصی ارائه شده و سپس بر اساس آن شکل دهی امپدانس خروجی اینورتر مورد بررسی قرار گرفته است که چنین راهکاری جامعیت ندارد. برای رفع ایراد مذکور، در این مقاله یک روش شکل دهی امپدانس که دارای مفهوم فیزیکی ملموس است، برای یک سیستم بهساز تزریق توان پیل سوختی پیشنهاد شده است. برای این منظور یک امپدانس سری مجازی با استفاده از فیدبک جریان شبکه به منظور حذف مولفه اکتیو طراحی شده است. در مسیر فیدبک مذکور از یک فیلتر بالاگذر برای اجتناب از تأثیرات نامطلوب امپدانس مجازی سری بر روی بهره فرکانس پایین و حد فاز سیستم استفاده شده است. از آنجا که با وجود استفاده از امپدانس مجازی سری، قابلیت تضعیف سیستم کنترلی در حوالی فرکانس رزونانس با تغییر پارامترهای فیلتر LCL با مخاطره مواجه می شود، از یک امپدانس مجازی موازی با استفاده از فیدبک ولتاژ نقطه اتصال مشترک برای رفع این مسئله استفاده شده است. در نهایت طراحی سیستماتیک و سراسر پارامترهای سیستم کنترل پیشنهادی برای سیستم بهساز تزریق توان پیل سوختی ارائه شده و با روش های موجود برای عملکرد انفعالی اینورتر متصل به شبکه مقایسه شده است. بخش های بعدی مقاله به شرح زیر تنظیم شده است. در بخش دوم، مدل سازی سیستم بهساز تزریق توان پیل سوختی متصل به شبکه با فیلتر LCL ارائه شده است. در بخش سوم، یک امپدانس سری و یک امپدانس موازی مجازی برای ایجاد رفتار پسیو معرفی می شوند و به دنبال آن تنظیم پارامتر آنها و مقایسه با روش های موجود انجام می شود. در بخش چهار آنالیز حساسیت و مقایسه ها مورد بحث قرار گرفته است. در بخش پنجم سیستم تحت مطالعه شبیه سازی شده و عملکرد آن ارزیابی شده است. نهایتاً جمع بندی و نتیجه گیری در بخش ششم ارائه شده است.

## ۲- پیل سوختی

### • اصول عملکردی پیل سوختی

اصول عملکردی یک پیل سوختی ساده است، اگرچه طراحی پیچیده ای دارد. الکترون آند یک سلول پیل سوختی به طور مداوم با سوخت هیدروژن و الکترون کاتد با اکسیژن موجود در هوا تغذیه می کند. سوخت هیدروژن موجود در آند جدا شده به یون های مثبت و یون های منفی تبدیل می شوند. لایه الکترولیت بین آند و کاتد اجازه می دهد تا فقط یون های مثبت در آند به کاتد منتقل شوند. به یون های منفی اجازه عبور نمی دهد و به عنوان یک عایق عمل می کند. این الکترون ها می خواهند برای اطمینان از پایداری با طرف دیگر لایه الکترولیت ترکیب شوند و الکترون های آزاد از یک مدار جدا (بار) از سمت کاتد عبور می کنند (Cao, ۲۰۲۳). این الکترون ها در طی این انتقال، الکتریسیته تولید می کنند. در کاتد، ترکیب مجدد یون های مثبت و

حلقه ای، فیدبک جریان شبکه با میرایی فعال به سادگی توسط یک فیلتر بالاگذر با طراحی بهینه اتخاذ می شود و به پهنای باند بالا و استحکام خوبی در برابر تغییرات پارامترهای LCL دست می یابد. میرایی فعال مبتنی بر فیلتر بالاگذر به طور بالقوه می تواند پهنای باند و استحکام بالایی را در مقایسه با میرایی های فعال با لحاظ تأخیر محاسباتی و ناچ فیلتر داشته باشد (Xu, ۲۰۱۳). در مراجع (Zhou, ۲۰۱۷, ۲۰۱۶) کنترل جریان شبکه تک حلقه ای با لحاظ تأخیر محاسباتی مبتنی بر میرایی فعال با فیلتر بالاگذر تجزیه و تحلیل شده است. تأخیر می تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد میرایی فعال تأثیر بگذارد. یک روش مبتنی بر نمونه برداری دوگانه برای جبران تأخیر در (Zhou, ۲۰۱۶) پیشنهاد شده است. طراحی پارامترهای فیلتر بالاگذر با در نظر گرفتن تأخیر در (Liu, ۲۰۱۶, Wu, ۲۰۱۷) بررسی شده است. برای اینورتر متصل به شبکه با فیلتر LCL، میرایی فعال مبتنی بر فیدبک جریان شبکه می تواند پهنای باند مطلوب و استحکام خوبی را تضمین کند. با این وجود، عملکرد اینورتر توسط شرایط غیر ایده آل در نقطه اتصال مشترک (PCC) از جمله اعوجاج ولتاژ شبکه و امپدانس شبکه متغیر به طور جدی به خطر می افتد (Zhu, ۲۰۱۹). میرایی فعال مبتنی بر فیدبک جریان شبکه نمی تواند برای تغییرات گسترده امپدانس شبکه به خوبی کار کند. از این رو در (Xu, ۲۰۱۸)، مقاوم بودن این روش کنترلی مورد بحث قرار گرفته است. روش شکل دهی امپدانس مبتنی بر امپدانس مجازی، روشی مکمل و بهبوددهنده روش های دیگر برای کنترل اینورتر متصل به شبکه در شبکه ضعیف و اعوجاجی است (Chen, ۲۰۱۷-). (Céspedes, ۲۰۱۲-۲۰۱۵) در (Yang, ۲۰۱۴) یک استراتژی شکل دهی با امپدانس های مجازی موازی و سری پیشنهاد شده است. در واقع، شکل دهی امپدانس مجازی موازی معادل استراتژی پیش خور ولتاژ نقطه اتصال مشترک است؛ به گونه ای که مقاوم بودن سیستم در برابر اغتشاشات شبکه را تضمین می کند (Chen, Yang, ۲۰۱۴). شکل دهی امپدانس مجازی سری معادل خنثی کردن قطب های سمت راست محور موهومی می باشد که منجر به بهبود پایداری سیستم می شود. اساساً شکل دهی امپدانس مجازی، امپدانس خروجی اینورتر را نسبت به اغتشاشات شبکه منفعل و پسیو می سازد. اگر امپدانس خروجی اینورتر غیرفعال (پسیو) باشد، می توان پایداری سیستم را بدون توجه به امپدانس شبکه تضمین کرد. در (Akhavan, ۲۰۲۰)، از یک روش مبتنی بر فیلتر دو ربعی به عنوان جبران کننده موازی با کنترل کننده جریان برای گسترش محدوده عملکرد پایدار و بهبود رفتار پسیو اینورتر متصل به شبکه استفاده شده است. در (Xie, ۲۰۲۰)، بهره بهینه میرایی فعال فیدبک جریان خازن برای اینورتر متصل به شبکه با فیلتر LCL به منظور بهبود عملکرد پسیو تا محدوده فرکانس نایکوئیست طراحی شده است. به منظور ارتقای عملکرد انفعالی اینورتر متصل به شبکه مرجع (Wang, ۲۰۲۲) با هدف تاب آوردن تغییرات پارامترهای فیلتر، در (Wang, ۲۰۲۲) از جبران ساز فاز در مسیر کنترل کننده جریان استفاده شده است. در خصوص بهبود عملکرد انفعالی در حضور میرایی فعال با فیدبک جریان خازن، در مرجع (Akhavan, ۲۰۲۰) پیشخور ولتاژ نقطه اتصال مشترک با استفاده از یک فیلتر پایین گذر و در

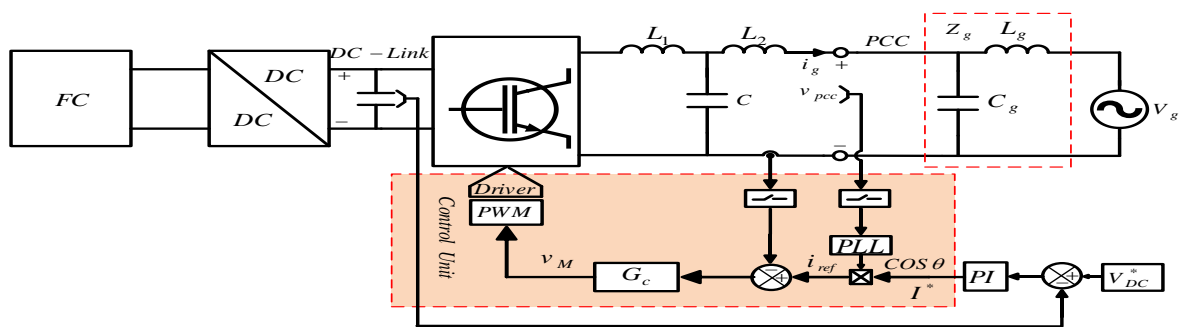


شکل ۱- ساختار پیل سوختی

### ۳- مدل سازی سیستم و ویژگی های عملکرد انفعالی

#### • شرح سیستم

شکل ۲ پیکربندی سیستم بهساز توان پیل سوختی متصل به شبکه با فیلتر LCL را نشان می دهد که  $L_1$ ،  $L_2$  و C به ترتیب سلف سمت اینورتر، سلف سمت شبکه و خازن فیلتر هستند. شبکه در نقطه PCC توسط یک منبع ولتاژ ایده آل  $V_g$



شکل ۲- پیکربندی سیستم بهساز توان پیل سوختی متصل به شبکه با فیلتر LCL

به صورت سری با امپدانس شبکه  $Z_g$  مدل سازی شده است. به طور کلی،  $Z_g$  با اندوکتانس های کابل های انتقال و ترانسفورماتورها و ظرفیت خازنی مدار تصحیح ضریب توان (Xie, ۲۰۲۰) معرفی می شود که با  $L_g$  و  $C_g$  نشان داده می شود. در اجزای فیلتر و امپدانس شبکه مقاومت های پارازیتی وجود دارد مقداری میرایی غیرفعال برای پایداری سیستم تامین می کنند. با توجه به اینکه در نظر گرفتن آن ها تجزیه و تحلیل پایداری سیستم را پیچیده می کند، در غالب تحقیقات از مقاومت های پارازیتی در تحلیل و طراحی پارامترهای کنترلی صرف نظر می شود (Wu, ۲۰۲۰, Wang, ۲۰۱۷, Xie, ۲۰۲۰). برای اعمال کنترل حلقه بسته، جریان شبکه  $i_g$  اندازه گیری می شود. ولتاژ نقطه اتصال مشترک VPCC برای همگام سازی جریان با ولتاژ شبکه از طریق یک حلقه قفل فاز (PLL) اندازه گیری می شود که  $\theta$  زاویه ردیابی است. زاویه  $\theta$  با دامنه جریان مرجع  $I^*$  ترکیب می شود و سیگنال جریان مرجع  $i_{ref}$  تشکیل می شود. در ادامه، خطای به تنظیم کننده جریان  $G_c$  ارسال می شود تا سیگنال مدولاسیون VM تولید شود. در نهایت، سیگنال های گیت سوئیچ های قدرت توسط مدولاتور عرض پالس (PWM) تولید می شود (Akhavan, ۲۰۲۰) از آنجا پاسخ دینامیکی حلقه جریان

#### • مدل سازی سیستم متصل به شبکه با فیلتر LCL

$$G_c(s) = K_p + \frac{2K_r s}{s^2 + \omega_o^2} \quad (4)$$

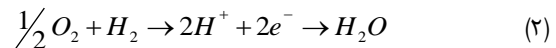
که  $K_p$  و  $K_r$  به ترتیب ضرایب تناسبی و رزونانسی هستند و  $\omega_o = 2\pi f_o$  فرکانس مولفه اصلی است. در شکل ۳-الف،  $G_d$  بیانگر تاخیر زمانی است که با مجموع تاخیر محاسباتی متناسب با یک

منفی و اکسیژن انجام می گیرد و آب خالص تشکیل می شود. واکنش های شیمیایی که در پیل سوختی در آند و کاتد رخ می دهد به شرح زیر است:

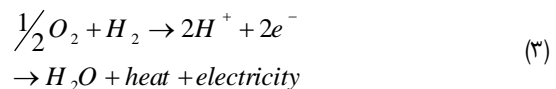
۱- واکنش در سمت آند بصورت زیر است:



۲- واکنش در سمت کاتد بصورت زیر است:



۳- واکنش کل نیز بصورت زیر است:



$$G_1(s) = \frac{G_d(s)}{s^2 L_1 C + 1} \quad (6)$$

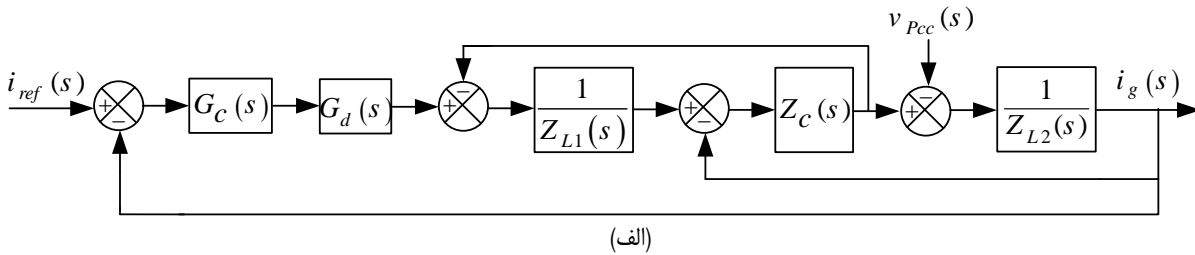
دوره تناوب نمونه برداری (Ts) و همچنین تاخیر نگهدارنده مرتبه صفر (ZOH) معادل در نظر گرفته می شود که در رابطه ۵ معرفی شده است.

$$G_2(s) = \frac{s^2 L_1 C + 1}{s^3 L_1 L_2 C + s(L_1 + L_2)} \quad (7)$$

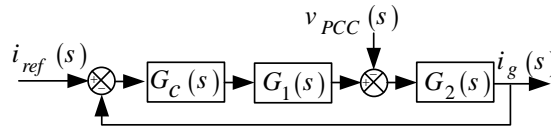
$$G_d(s) = e^{1.5sT_s} \quad (8)$$

با توجه به بلوک دیاگرام معادل شکل ۳-ب، تابع تبدیل حلقه باز Tol با همان بهره حلقه رامی توان به صورت زیر به دست آورد:

با اشاره به بلوک های معادل مطابق مرجع (Wang, ۲۰۲۲)، بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۳-الف را می توان با شکل ۳-ب نمایش داد که عبارات  $G_1$  و  $G_2$  در این شکل با روابط ۶ و ۷ قابل بیان هستند.



(الف)



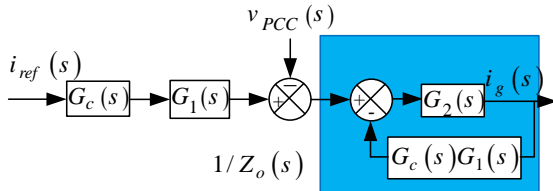
(ب)

شکل ۳- بلوک دیاگرام سیستم متصل به شبکه با فیلتر LCL (الف) بلوک دیاگرام اولیه، (ب) بلوک دیاگرام معادل

مدار معادل نورتون متشکل از یک منبع جریان ایده آل  $i_{ref} \cdot [T_{ol}/(1+T_{ol})]$  به موازات امپدانس خروجی  $Z_o$  مدل سازی کرد.

$$T_{ol}(s) = G_c(s)G_1(s)G_2(s) \quad (8)$$

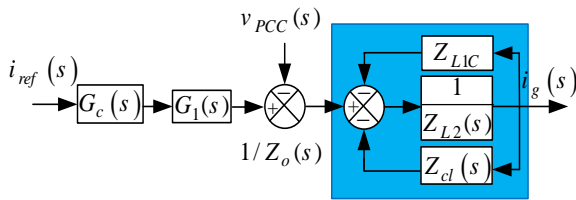
و جریان شبکه را می توان به صورت زیر بیان کرد:



(الف)

$$i_g(s) = \frac{T_{ol}(s)}{1+T_{ol}(s)} i_{ref}(s) - \frac{v_{pcc}(s)}{Z_o(s)} \quad (9)$$

که در آن  $Z_o$  امپدانس خروجی اینورتر است که به صورت بیان می شود:



(ب)

$$Z_o(s) = \frac{1+T_{ol}(s)}{G_2(s)} \quad (10)$$

با جایگزینی ۷ و ۸ در ۱۰ و اصلاح  $Z_o$ ، رابطه ۱۱ حاصل می شود.

$$Z_o(s) = s \frac{L_1}{Z_{L2}(s)} + \frac{G_c(s)G_d(s)}{Z_{L1C}(s)Z_{cl}(s)} \quad (11)$$

شکل ۴- بلوک دیاگرام برای محاسبه امپدانس خروجی اینورتر، (الف) بلوک دیاگرام اولیه، (ب) بلوک دیاگرام معادل

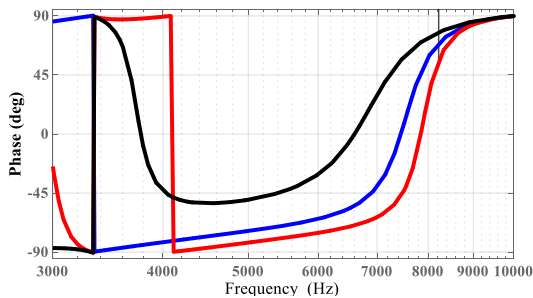
در رابطه بالا  $Z_{L1C}$  امپدانس  $L_1$  به موازات  $C$  است. با حرکت گره فیدبک جریان  $i_g$  در شکل ۳-ب از ورودی  $G_c$  به ورودی  $G_2$ ، شکل ۳-الف به دست می آید. مطابق رابطه ۱۱،  $Z_o$  را می توان به سه عنصر سری شامل دو عنصر غیرفعال  $Z_{L1C}$ ،  $Z_{L2}$  و یک عنصر فعال  $Z_{cl}$  تجزیه کرد و بنابراین شکل ۴-الف را می توان به شکل ۴-ب دوباره ترسیم کرد. از دید فیزیکی، اینورتر را می توان مطابق شکل ۵ با یک

با جایگزینی  $s = j\omega$  در رابطه ۱۴ و در نظر گرفتن قسمت حقیقی امپدانس  $Z_{cl}$  رابطه ۱۵ حاصل می‌شود که در این رابطه  $\omega_{LIC} = 1/\sqrt{L_1 C}$  می‌باشد.

$$\text{Re}[Z_o(j\omega)] = \text{Re}[Z_{cl}(j\omega)] = \frac{K_p \cos(1.5\omega T_s)}{1 - (\omega/\omega_{LIC})^2} \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، مقدار  $K_p$  مثبت است و بنابراین عملکرد انفعالی  $Z_o$  به عبارت‌های  $(\omega/\omega_{LIC})^2 - 1$  و  $\cos(1.5\omega T_s)$  بستگی دارد که به ترتیب در  $\omega_{LIC}$  و  $\omega_s/6$  از مثبت به منفی تغییر می‌کنند. با توجه به ارتباط مقادیر  $\omega_{LIC}$  و  $\omega_s/6$  با یکدیگر، می‌توان سه حالت مطابق موارد زیر دسته‌بندی کرد که در شکل ۶ نیز نشان داده شده است.

(۱) وقتی  $\omega_{LIC} < \omega_s/6$  باشد،  $\text{Re}[Z_o(j\omega)] < 0$  رخ می‌دهد. بنابراین در محدوده فرکانسی  $(\omega_{LIC}, \omega_s/6)$ ، امپدانس خروجی  $Z_o$  خاصیت میرایی ندارد



شکل ۶- نمودارهای فاز  $Z_o$  به ازای مقادیر مختلف  $\omega_{LIC}$  و  $\omega_s/6$

(۲) وقتی  $\omega_{LIC} > \omega_s/6$  باشد،  $\text{Re}[Z_o(j\omega)] < 0$  رخ می‌دهد. بنابراین در محدوده فرکانسی  $(\omega_s/6, \omega_{LIC})$ ، امپدانس خروجی  $Z_o$  خاصیت میرایی ندارد.

(۳) وقتی  $\omega_{LIC} = \omega_s/6$  باشد،  $\text{Re}[Z_o(j\omega)] \geq 0$  حاصل می‌شود. بنابراین در محدوده فرکانسی  $(\omega_s/6, \omega_{LIC})$ ، امپدانس خروجی  $Z_o$  دارای خاصیت میرایی است.

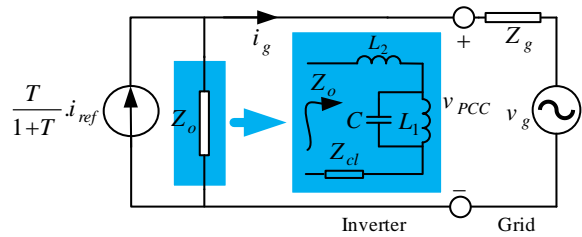
با بررسی سه مورد فوق مشخص است که مورد سوم می‌تواند منجر به عملکرد انفعالی اینورتر شود. با این حال، با دقت در رابطه  $\omega_{LIC}$  می‌توان دریافت که عملکرد انفعالی در حالت سوم به تغییرات مقادیر  $L_1$  و  $C$  حساس است. بنابراین، در ناحیه سوم نیز بهبود بیشتر عملکرد انفعالی موردنیاز است.

#### ۴- شکل‌دهی امپدانس مجازی

به منظور افزایش انفعال امپدانس خروجی اینورتر  $Z_o$ ، شکل‌دهی امپدانس یک راهکار موثر است. در این بخش یک رویکرد شکل‌دهی امپدانس مبتنی بر امپدانس مجازی سری و امپدانس مجازی موازی ارائه شده است.

#### • شکل‌دهی امپدانس مجازی سری

همانطور که قبلاً بیان شد، محدوده‌ای که امپدانس خروجی اینورتر  $Z_o$  دارای خاصیت میرایی است با مقادیر امپدانس  $Z_{cl}$  دارای ارتباط است. همانگونه که در شکل ۷ نشان داده شده، یک راهکار مستقیم برای بهبود عملکرد انفعالی، حذف امپدانس  $Z_{cl}$  با استفاده از یک امپدانس سری مجازی  $Z_s$  است. در چنین شرایطی، صرفاً عناصر غیرفعال در



شکل ۵- مدار معادل اینورتر متصل به شبکه با فیلتر LCL

#### • تجزیه و تحلیل عملکرد انفعالی امپدانس خروجی

بر اساس رابطه ۱۰ و در نظر گرفتن  $v_{PCC} = i_g Z_g + v_g$  می‌توان رابطه ۱۲ را نوشت.

$$i_g(s) = \frac{\frac{T(s)}{1+T(s)} i_{ref}(s) - \frac{v_g(s)}{Z_g(s)}}{1 + \frac{Z_g(s)}{Z_o(s)}} \quad (12)$$

بخش اول رابطه ۱۲ ارتباطی با امپدانس شبکه  $Z_g$  ندارد و تعیین کننده پایداری داخلی سیستم است. مورد دوم مرتبط با  $Z_g$  است و تعیین کننده پایداری خارجی سیستم است (Xie, ۲۰۱۹, Wang, ۲۰۲). در واقع، پایداری داخلی را می‌توان به راحتی با طراحی مناسب پارامترهای تابع تبدیل حلقه باز  $T_{ol}$  تضمین نمود، در حالی که اطمینان از پایداری خارجی امری پیچیده است. بخش دوم رابطه ۱۲ را می‌توان به عنوان یک حلقه کوچک و جزئی در نظر گرفت که بهره مسیره‌های پیشرو و فیدبک آن به ترتیب واحد و  $Z_g/Z_o$  هستند. با این معادلسازی، شرط پایداری خارجی سیستم آن است که  $Z_g/Z_o$  معیار پایداری نایکوئیست را برآورده کند. به بیان دقیق‌تر، پایداری خارجی به حاشیه فاز امپدانس‌های  $Z_o$  و  $Z_g$  ( $PM_{int}$ ) در فرکانس تقاطع بهره  $(\omega_{int})$  آن‌ها بستگی دارد. این حاشیه فاز را با رابطه ۱۳ می‌توان بیان نمود.

$$PM_{int} = 180^\circ - [\angle Z_g(j\omega_{int}) - \angle Z_o(j\omega_{int})] \quad (13)$$

برای اطمینان از پایداری سیستم  $PM_{int} > 0^\circ$  مورد انتظار است. از آنجایی که در عمل محدوده  $-90^\circ \leq \angle Z_g(j\omega_{int}) \leq 90^\circ$  معمولاً برقرار است، امپدانس شبکه  $Z_g$  رفتار پسیو و غیرفعال دارد و پایداری خارجی با رفتار پسیو و غیرفعال امپدانس خروجی  $Z_o$  حاصل می‌شود. بر اساس رابطه ۱۱، بخش‌های حقیقی هر دو امپدانس  $Z_{L1}$  و  $Z_{L2}$  صفر هستند. بنابراین بخش حقیقی امپدانس خروجی  $Z_o$  مطابق با امپدانس  $Z_{cl}$  است.

با توجه به اینکه تنظیم کننده PR برای حذف خطای حالت ماندگار ردیابی جریان در فرکانس مولفه اصلی استفاده می‌شود و در سایر فرکانس‌ها اثر چندانی ندارد، ساده‌سازی امپدانس فعال  $Z_{cl}$  در رابطه ۱۱، رابطه ۱۴ را حاصل می‌کند.

$$Z_{cl}(s) = \frac{K_p G_d(s)}{s^2 L_1 C + 1} \quad (14)$$

با جایگزینی روابط ۴ و ۵ در ۱۷ و با فرض  $s = 0$ ،  $T'(0) = -1$  حاصل می‌شود. این مقدار بیانگر کاهش بهره حلقه در محدوده فرکانس پایین است. علاوه بر این، ضریب  $-K_p$  باعث افت چشمگیر فاز  $T'$  از  $0^\circ$  تا  $-180^\circ$  می‌شود که حد فاز سیستم را به نحو قابل توجهی به مخاطره می‌اندازد. به منظور کاهش این اثرات نامطلوب، شکل‌دهی امپدانس سری باید در محدوده فرکانس پایین غیرفعال شود. برای این منظور، یک فیلتر بالاگذر  $G_h$  استفاده شده و تابع اصلاح شده  $G'_s$  مطابق رابطه ۱۸ حاصل می‌شود که در این رابطه  $\omega_h$  فرکانس قطع فیلتر بالاگذر است.

$$G'_s(s) = G_s(s)G_h(s) = -K_p \frac{s}{s + \omega_h} \quad (18)$$

با استفاده از رابطه ۱۸، بهره حلقه در ۱۷ مطابق رابطه ۱۹ اصلاح می‌شود. در ضمن امپدانس سری مجازی اصلاح شده  $Z'_s$  مطابق رابطه ۱۷ قابل بیان است.

$$T''(s) = \frac{G_c(s)G_d(s)}{s^3 L_1 L_2 C + s(L_1 + L_2) + G'_s(s)G_d(s)} \quad (19)$$

$$Z'(s) = \quad (20)$$

$$Z_s(s) \cdot \frac{G'_s(s)}{G_s(s)} = -Z_{cl}(s)G_h(s)$$

امپدانس خروجی اصلاح شده اینورتر  $Z'_o$  مطابق رابطه ۲۱ و امپدانس فعال اصلاح شده  $Z'_{cl}$  مطابق رابطه ۲۲ حاصل می‌شود.

$$Z'_o(s) = Z_{L2}(s) + Z_{LIC}(s) + Z'_{cl}(s) \quad (21)$$

$$Z'_{cl}(s) = \frac{Z'_s(s) + Z_{cl}(s)}{Z_{cl}(s)} = [1 - G_h(s)] \quad (22)$$

با توجه به رابطه ۲۱ می‌توان دریافت که عملکرد انفعالی امپدانس خروجی اصلاح شده  $Z'_o$  به عملکرد انفعالی امپدانس فعال اصلاح شده  $Z'_{cl}$  وابسته است. با جایگزینی  $s = j\omega$  در رابطه ۲۲، بخش حقیقی امپدانس فعال اصلاح شده  $Z'_{cl}$  را می‌توان مطابق رابطه ۲۳ بیان کرد که در آن  $f(\omega)$  مطابق رابطه ۲۴ قابل بیان است.

$$\text{Re}[Z'_{cl}(j\omega)] = \frac{K_p \omega_h^2}{\omega^2 + \omega_h^2} \cdot \frac{f(\omega)}{1 - (\omega/\omega_{LIC})^2} \quad (23)$$

$$f(\omega) = \cos(1.5\omega T_s) - \omega \sin(1.5\omega T_s) / \omega_h \quad (24)$$

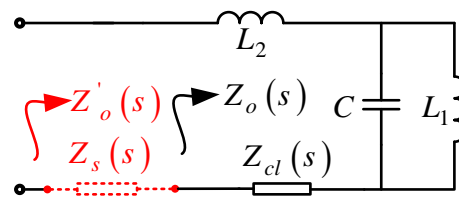
با جایگزینی  $\omega = \omega_{LIC}$  در رابطه ۲۴ و در نظر گرفتن عبارت  $f(\omega_{LIC}) = 0$  می‌توان مقدار فرکانس قطع فیلتر بالاگذر را مطابق رابطه ۲۵ دست آورد.

امپدانس خروجی اینورتر باقی می‌ماند و ناشی از پسیو بودن امپدانس خروجی، پایداری اینورتر تضمین می‌شود.

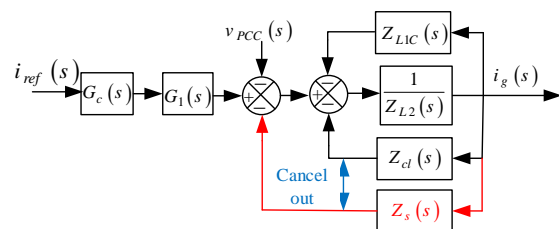
بر اساس شکل ۴-ب، امپدانس سری مجازی  $Z_s$  را در بلوک دیاگرام معادل می‌توان مطابق شکل ۸-الف با فیدبک جریان  $\dot{i}_g$  اعمال نمود. برای پیاده‌سازی عملی در حلقه کنترل، گره فیدبک جریان  $\dot{i}_g$  به خروجی کنترل کننده جریان  $G_c$  انتقال داده شده و بهره مسیر فیدبک مربوطه به  $G'_s = Z_s/G_1$  اصلاح می‌شود که در شکل ۸-ب نشان داده شده است. با فرض  $Z_s = -Z_{cl}$  و با در نظر گرفتن رابطه ۱۴، عبارت  $G'_s$  مطابق ۱۶ قابل بیان است.

$$G'_s(s) = \frac{Z_s(s)}{G_1(s)} = \frac{-Z_{cl}(s)}{G_1(s)} = \quad (16)$$

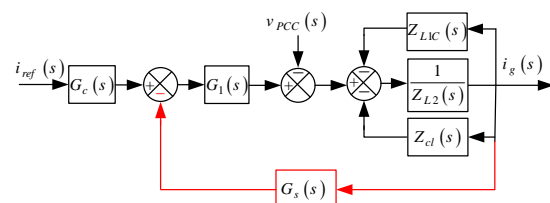
$$-G_c(s) \approx -K_p$$



شکل ۷- مدار معادل امپدانس خروجی اینورتر متصل به شبکه با امپدانس سری مجازی



(الف)



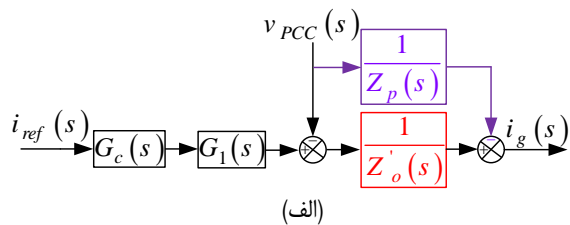
(ب)

شکل ۸- بلوک دیاگرام برای اجرای امپدانس سری مجازی، (الف) بلوک دیاگرام اولیه، (ب) بلوک دیاگرام معادل

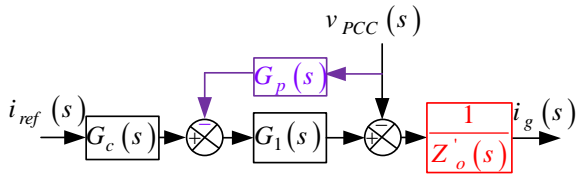
### چالش‌های عملی شکل‌دهی امپدانس سری

با اعمال بلوک دیاگرام شکل ۸-ب مطابق رابطه ۱۶ امپدانس خروجی اینورتر به صورت غیرفعال شکل‌دهی می‌شود. از آنجا که مقدار معادل  $G'_s$  مطابق رابطه ۱۶ یک ضریب تناسبی منفی است؛ چالش موجود در این راهکار وجود یک فیدبک تناسبی مثبت از  $\dot{i}_g$  است که منجر به کاهش بهره حلقه به ویژه در محدوده فرکانس پایین می‌شود. با توجه به شکل ۸-ب، بهره حلقه با در نظر گرفتن شکل‌دهی امپدانس سری با  $T'$  نشان داده شده و مطابق رابطه ۱۷ بیان می‌شود.

$$T'(s) = \frac{G_c(s)G_d(s)}{s^3 L_1 L_2 C + s(L_1 + L_2) - K_p G_d(s)} \quad (17)$$



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- بلوک دیاگرام برای اجرای امپدانس موازی مجازی، (الف) بلوک دیاگرام اولیه، (ب) بلوک دیاگرام معادل

$$Z_o''(s) = \frac{Z'_o(s)Z_p(s)}{Z'_o(s)Z_p(s)} = \frac{1}{1+G_p(s)G_1(s)}Z'_o(s) \quad (27)$$

$$Z_o''(j\omega) = \frac{1}{1+G_p(j\omega)G_1(j\omega)}Z'_o(j\omega) \quad (28)$$

رابطه فاز مرتبط با رابطه ۲۸ توسط رابطه ۲۹ قابل بیان است.

$$\angle Z_o''(j\omega) - \angle Z'_o(j\omega) = -\angle [1+G_p(j\omega)G_1(j\omega)] \quad (29)$$

برای تعیین یک  $G_p$  مناسب، حاشیه فاز عبارت  $1+G_p(j\omega)G_1(j\omega)$  باید مشخص باشد. طبق رابطه ۲۹ حاشیه فاز این عبارت اختلاف  $\angle Z'_o$  و  $\angle Z_o''$  است. مقدار  $\angle Z'_o$  را می‌توان بر اساس شکل ۱۰ به دست آورد. با فرض اینکه  $Z_o''$  به صورت غیرفعال شکل‌دهی شده باشد، زاویه فاز آن در محدوده  $-90^\circ < \angle Z_o''(j\omega) < 90^\circ$  خواهد بود و حاشیه فاز مورد انتظار عبارت

$$1+G_p(j\omega)G_1(j\omega)$$

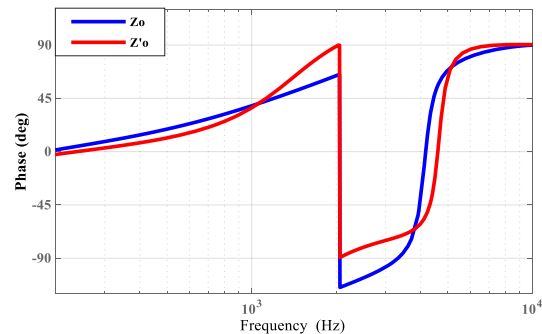
اگر فاز  $G_1(j\omega)$  به درستی مشخص شود، عبارت مناسب برای  $G_p$  مطابق با الزامات جدول ۱ به دست می‌آید. با توجه به اینکه معمولاً برای اطمینان از تضعیف قابل قبول فرکانس کلیدزنی،  $\omega L_{IC} < \omega s/3$  تنظیم می‌شود (Lu, ۲۰۱۷, He, ۲۰۱۹)، و با توجه به رابطه ۳ و همچنین عبارت  $\angle G_1(j\omega) = -1.5\omega Ts$  می‌تواند یک بهره تناسبی منفی ساده مطابق عبارت  $G_p(s) = -Kpf$  تعریف شود. بدین ترتیب یک پیشخور تناسبی مثبت از  $v_{PCC}$  برای شکل‌دهی موازی امپدانس حاصل می‌شود. بدین ترتیب بلوک دیاگرام کامل کنترلی اینورتر متصل به شبکه شامل شکل‌دهی امپدانس سری و موازی مجازی مطابق شکل ۱۲ قابل نمایش است.

جدول ۱- فاز مورد انتظار عبارت  $1+G_p(j\omega)G_1(j\omega)$

$\omega < \omega_{LIC}$	$\omega > \omega_{LIC}$
-------------------------	-------------------------

$$\omega_h = \omega_{LIC} \tan(1.5\omega_{LIC}Ts) \quad (25)$$

شکل ۹ نمودار فاز  $Z_o$  و  $Z'_o$  را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ناحیه غیرمیرای  $Z_o$  یعنی  $(\omega_{sg1}, \omega_{sg2})$  برای  $Z'_o$  به ناحیه دارای خاصیت میرایی تغییر کرده، در حالی که ناحیه میرایی آن، یعنی  $(\omega_{sg2}, \omega_{sg3})$  به طور معکوس خاصیت میرایی ندارد. ناحیه نامیرای جدید  $Z_o$  به دلیل  $f(\omega) > 0$  و  $1 - (\omega/\omega_{LIC})^2 < 0$  در این محدوده فرکانس است. علاوه بر این، نمودار فاز  $Z'_o$  همچنان بر خطوط ۹۰ درجه و  $-90^\circ$  درجه در  $\omega_{LIC}$  مماس است، به این معنی که میرایی  $Z'_o$  در  $\omega_{LIC}$  به تغییرات  $L_1$  و  $C$  حساس است. بنابراین همچنان در عملکرد انفعالی امپدانس خروجی اینورتر بایستی بهبود اعمال شود.



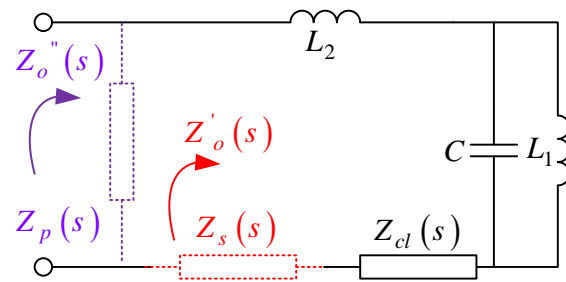
شکل ۹- نمودار فاز امپدانس‌های خروجی  $Z_o$  و  $Z'_o$

#### • شکل‌دهی امپدانس موازی

برای رفع چالش حساسیت امپدانس خروجی اینورتر در حضور شکل‌دهی امپدانس سری به تغییرات  $L_1$  و  $C$  در فرکانس  $\omega_{LIC}$ ، یک امپدانس موازی  $Z_p$  مطابق شکل ۱۰ معرفی شده است. بلوک دیاگرام اولیه برای پیاده‌سازی  $Z_p$  در شکل ۱۱-الف نشان داده شده است. انتقال گره پیشخور  $v_{PCC}$  به خروجی  $G_c$ ، بلوک دیاگرام معادل را مطابق شکل ۱۱-ب شکل می‌دهد که در آن عبارت  $G_p$  مطابق رابطه ۲۶ بیان می‌شود.

$$G_p(s) = \frac{Z'_o(s)}{Z_p(s)G_1(s)} \quad (26)$$

طبق رابطه ۲۶ امپدانس موازی مجازی  $Z_p$  را می‌توان از طریق فیدبک از  $v_{PCC}$  با تابع تبدیل  $G_p$  اجرا نمود. بدین ترتیب امپدانس خروجی اینورتر شکل‌دهی بیشتری شده و رابطه ۲۷ حاصل شده و با جایگزینی  $s = j\omega$  در آن، رابطه ۲۸ حاصل می‌شود.



شکل ۱۰- مدار معادل امپدانس خروجی اینورتر با امپدانس‌های سری مجازی و موازی

مرحله ۴: دیاگرام فاز  $Z''_o$  را طبق رابطه ۲۷ با افزایش مناسب ضریب  $K_{pf}$  بدست آورید.

مرحله ۵: یک مقدار  $K_{pf}$  قابل قبول را انتخاب کنید و غیرفعال بودن امپدانس خروجی اینورتر را بررسی کنید.

برای بررسی کارایی روند تنظیم پارامترها، با در نظر گرفتن مقادیر نمونه اولیه مطابق جدول ۲، تعیین مقادیر ضرایب کنترلی با جزئیات ارائه شده است. برای طراحی فیلتر LCL محدودیت‌های مرسوم شامل موارد زیر لحاظ شده است. ریبیل جریان سمت اینورتر کمتر از ۳۰٪ جریان مولفه اصلی نامی است، توان راکتیو خازن فیلتر کمتر از ۵ درصد توان خروجی نامی است و هارمونیک کلیدزنی کمتر از ۰/۳٪ جریان نامی است.

در گام نخست فرکانس قطع فیلتر بالاگذر  $\omega_h$  طبق رابطه ۲۵ حدود ۱۸۸۰ رادیان بر ثانیه محاسبه می‌شود. سپس، پارامترهای کنترل کننده جریان  $K_p$  و  $K_r$  با توجه به الزامات فرکانس تقاطع بهره  $f_c$ ، حاشیه فاز  $PM$  و حاشیه بهره  $GM$  تنظیم می‌شوند.

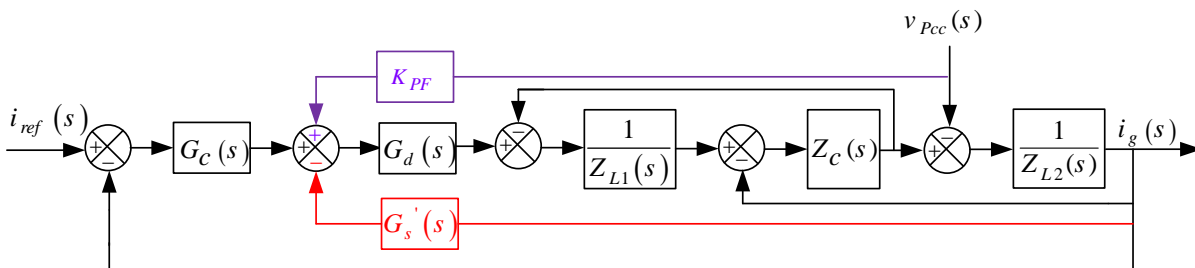
	$\omega_{L1C} < \omega \leq \omega_{sg2}$	$\omega_{sg2} < \omega \leq \omega_s / 2$
پیش فاز	پس فاز	پیش فاز

### • تنظیم پارامتر شکل‌دهی امپدانس مجازی

مراحل زیر به صورت گام به گام به منظور تنظیم پارامترهای شکل‌دهی توضیح داده شده است. با انجام این مراحل از تنظیم دقیق پارامترها و مقاوم بودن اینورتر در مقابل تغییرات امپدانس شبکه اطمینان حاصل می‌شود.

مرحله ۱: فرکانس قطع فیلتر بالاگذر  $\omega_h$  را از رابطه ۲۵ محاسبه کنید. مرحله ۲: با توجه به بهره حلقه اصلاح شده  $T''$  مطابق رابطه ۱۶، الزامات فرکانس تقاطع بهره  $f_c$ ، حاشیه فاز  $PM$  و حاشیه بهره  $GM$  را مشخص کنید.

مرحله ۳: پارامترهای تنظیم کننده جریان شامل ضرایب  $K_p$  و  $K_r$  را تنظیم کنید تا پایداری اینورتر مطابق با بهره حلقه اصلاح شده  $T''$  تضمین شود.



شکل ۱۲- بلوک دیاگرام کامل سری مجازی و روش شکل‌دهی امپدانس موازی

مطابق شکل ۱۲، نمودار بود بهره حلقه اصلاح شده  $T''$  طبق رابطه ۱۹،  $f_c = 1 \text{ kHz}$ ،  $PM = 45^\circ$ ،  $GM_1 = 8,7 \text{ dB}$  و  $GM_2 = 9,8 \text{ dB}$  حاصل شده است. این مقادیر نشان می‌دهند که پایداری قابل قبولی برای اینورتر حاصل شده است. در نهایت، با کمک رسم دیاگرام بودهای مختلف به ازای مقادیر مختلف  $K_{pf}$  این ضریب هم تنظیم می‌شود. نمودارهای فاز  $Z''_o$  به ازای افزایش  $K_{pf}$  از صفر به ۱/۰۵ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق این شکل، ضریب  $K_{pf}$  بزرگ‌تر رفتار میرای امپدانس خروجی اینورتر را در محدوده فرکانس بالا افزایش ولی در محدوده فرکانس پایین کاهش می‌دهد. با انتخاب  $K_{pf}$  در محدوده (۱، ۰/۱) نمودار فاز  $Z''_o$  در محدوده  $\pm 90^\circ$  باقی می‌ماند. یعنی امپدانس خروجی اینورتر تا فرکانس نایکوئیست خاصیت میرایی دارد. با توجه به اینکه مقدار کوچک  $K_{pf}$  منجر به رفتار دینامیکی ضعیف در طول اعوجاجات ولتاژ می‌شود و همچنین با توجه به تغییرات پارامترهای فیلتر LCL، مقدار  $K_{pf}$  نباید به مقادیر مرزی یعنی ۰/۱ یا ۱ نزدیک باشد. با این توضیحات  $K_{pf} = 0,6$  انتخاب شده است.

جدول ۲- مقادیر نمونه اولیه

پارامتر	مقدار
فرکانس نمونه برداری (هرتز)	۲۰ کیلو هرتز
سلف سمت اینورتر (هانری)	۶۰۰ میکرو هانری
سلف سمت شبکه (هانری)	۱۵۰ میکرو هانری
خازن فیلتر (فاراد)	۱۰ میکرو فاراد
توان خروجی (وات)	۹/۱ کیلووات
ولتاژ ورودی (ولت)	۳۶۵ ولت
ولتاژ موثر شبکه (هرتز)	۲۲۰ ولت
فرکانس سوئیچ‌زنی (هرتز)	۱۰ کیلو هرتز

برای به دست آوردن یک پاسخ دینامیکی مناسب، فرکانس قطع معمولاً یک دهم فرکانس کلیدزنی در نظر گرفته می‌شود. حد فاز  $PM$  مناسب بین ۳۰ درجه و ۶۰ درجه می‌باشد. حد بهره  $GM$  توصیه می‌شود کمتر از ۲ دسی بل نباشد. با در نظر گرفتن این الزامات،  $K_p = 3,8$  و  $K_r = 290 \text{ } \Omega/\text{s}$  انتخاب می‌شوند.

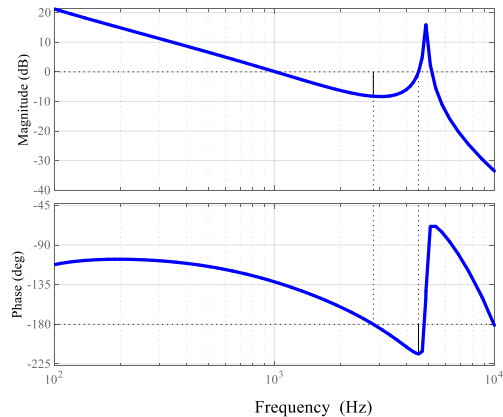
برای خازن در نظر گرفته می‌شود (Yang, ۲۰۱۴). بر این اساس، دو سناریو برای تغییر مقادیر  $L_1$ ،  $L_2$  و  $C$  شامل افزایش و کاهش ۲۰ درصدی مقادیر سلف‌ها و ۱۰ درصدی مقدار خازن انتخاب شده و نمودارهای فاز مرتبط  $Z''_o$  در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مطابق این شکل با اعمال این تغییرات، نمودارهای فاز مرتبط همچنان در بازه (۹۰- درجه، ۹۰ درجه) باقی می‌مانند که نشان می‌دهد خاصیت میرایی امپدانس خروجی شکل‌دهی شده تا فرکانس ناپکیوست همچنان حفظ می‌شود. این تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در برابر تغییرات پارامترهای فیلتر LCL مقاوم است.

#### • مقایسه با روش‌های مشابه

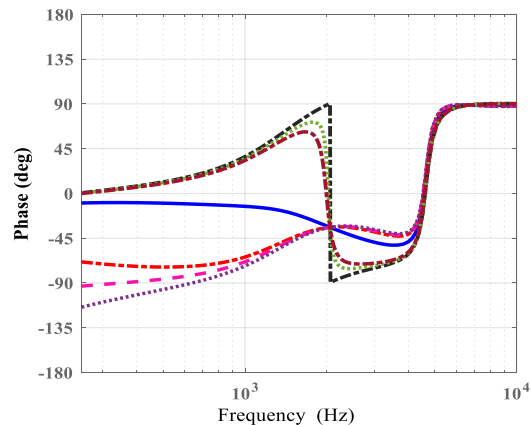
روش شکل دهی امپدانس مجازی برای پیل سوختی متصل به شبکه با روش‌های موجود مقایسه شده است که در جدول ۳ خلاصه شده و به شرح زیر نشان داده شده است.

#### • تجزیه و تحلیل حساسیت

مقادیر اندوکتانس و ظرفیت خازنی فیلتر LCL ممکن است با گذر زمان و یا به هر دلیل دیگری از مقادیر نامی خود انحراف داشته باشد. در این بخش، حساسیت روش پیشنهادی در برابر تغییرات پارامترهای فیلتر مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۱۳- نمودار بود بهره حلقه  $T''$  طبق رابطه (۱۹)



شکل ۱۴- نمودارهای فاز  $Z''_o$  با مقادیر مختلف  $K_{pf}$

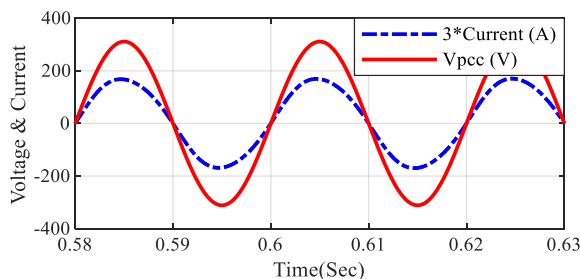
تغییرات اندوکتانس و ظرفیت خازنی به شرایط بهره‌برداری و خطای ساخت بستگی دارد. معمولاً تغییرات ۲۰٪ برای اندوکتانس و ۱۰٪

جدول ۳- مقایسه کارایی روش‌های مختلف برای اینورتر متصل به شبکه با فیلتر LCL

مراجع	روش	سنسور اضافی	کنش‌پذیری	استحکام	پیچیدگی
(Wang, ۲۰۱۴)	کنترل کننده مشتق منفی تعبیه شده	خیر	غیر اتلافی در محدوده فرکانس بالا	در اطراف $\omega_{LC}$ ضعیف است	ساده
(Xie, ۲۰۲۰) (Cao, ۲۰۲۳)	فیدبک ولتاژ خازن	ضروری	اتلاف کننده تا $\omega_s/2$	بالا	ساده
Rodriguez- (Diaz, ۲۰۱۸)	فیدبک جریان خازن به اضافه پیشخور ولتاژ PCC	ضروری	اتلاف کننده تا $\omega_s/2$	بالا	معمولی
(Hans, ۲۰۱۸)	فیدبک جریان خازن مبتنی بر ناظر به اضافه پیشخور ولتاژ PCC	خیر	اتلاف کننده تا $\omega_s/2$	بالا	پیچیده
پیشنهادی	فیدبک جریان شبکه به اضافه پیشخور ولتاژ PCC	خیر	اتلاف کننده تا $\omega_s/2$	بالا	ساده

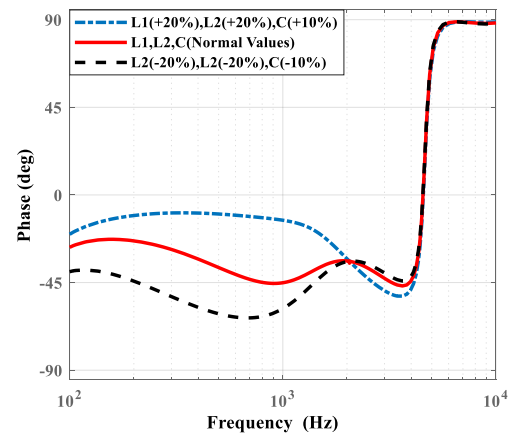
شبکه تزریق می‌شود. سیستم بهساز پیل سوختی متصل به شبکه با حضور امپدانس سری و موازی مجازی و همچنین بدون حضور امپدانس‌های مجازی مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی استخراج شده است. به منظور نشان دادن رفتار دینامیکی سیستم بهساز پیل سوختی، مقدار سوخت بر روی پیل سوختی تغییر یافته تا سرعت و دقت ردگیری جریان مرجع مورد ارزیابی قرار گیرد. مقادیر سیستم تحت مطالعه مطابق مقادیر ارائه شده در جدول ۲ می‌باشد. ضرایب کنترل کننده PI ولتاژ لینک DC واسط مبدل DC-DC و اینورتر متصل به شبکه برابر با  $K_p=0.9$ ،  $K_i=22$  و  $K_p=0.36$  و ولت انتخاب شده است.

شکل ۱۶ ولتاژ نقطه اتصال مشترک و جریان تزریقی سیستم بهساز توان پیل سوختی به شبکه را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، جریان تزریقی کاملاً هم فاز با ولتاژ نقطه اتصال مشترک است. لازم به توضیح است جریان تزریقی به شبکه جهت نمایش بهتر با ضریب سه نمایش داده شده است. در شکل ۱۷ THD جریان تزریقی به شبکه نشان داده شده است. مطابق این شکل کیفیت جریان تزریقی به شبکه کاملاً مطلوب بوده و THD برابر با  $2/83\%$  حاصل شده است. در ضمن قسمت غالب این اعوجاج ناشی از اعوجاج هارمونیک سوم است که ناشی از نوسانات ناچیز ولتاژ لینک DC اینورتر به وجود آمده است. این نوسانات ولتاژ لینک DC ناشی از عملکرد پیل سوختی بوده و امری اجتناب‌ناپذیر است. دقت در طیف فرکانسی نشان می‌دهد به غیر از یک اعوجاج  $1/25$  درصدی در هارمونیک سوم، عملکرد سیستم بهساز توان مناسب بوده و هارمونیک قابل توجه دیگری در طیف فرکانسی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۶- ولتاژ و جریان خروجی پیل سوختی متصل به شبکه در حضور امپدانس‌های مجازی

شکل ۱۸ جریان و ولتاژ شبکه در حضور و عدم حضور امپدانس‌های مجازی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، از لحظه شروع تا لحظه  $0/35$  ثانیه، سیستم بهساز توان پیل سوختی با حضور امپدانس‌های مجازی سری و موازی عمل نموده و در لحظه  $0/35$  ثانیه امپدانس‌های مجازی سری و موازی از سیستم کنترل خارج شده که در ادامه ولتاژ و جریان خروجی ریبیل شدیدی پیدا کرده و عملاً سیستم بایستی از مدار خارج شود.



شکل ۱۵- نمودارهای فاز  $Z''_o$  برای تجزیه و تحلیل حساسیت

الف- سنسور اضافی: در (Xie, 2019, Wang, 2022), یک سنسور جریان یا ولتاژ اضافی برای سنجش جریان یا ولتاژ خازن مورد نیاز است، در حالی که در روش پیشنهادی و روش‌های (Cao, 2023, Harnefors, 2014), نیازی به این سنسور نیست.

ب- کنش‌پذیری: در (Wang, 2017), خاصیت میرایی امپدانس خروجی اینورتر در محدوده فرکانس بالا به دست نمی‌آید، در حالی که روش‌های دیگر می‌توانند تا فرکانس  $\omega/2$  این امر را محقق کنند.

ج- مقاوم بودن: در (Wang, 2017), مقاوم بودن در برابر تغییرات پارامتر فیلتر حول فرکانس  $\omega_{LIC}$  ضعیف است، در حالی که روش‌های دیگر بهتر است.

د- پیچیدگی: در (Wang, 2017), روند طراحی مربوطه بر اساس یک کنترل تک حلقه است، که در آن محاسبات عددی، مانند نمودارهای بود و قطب صفر، استفاده شده است. در (Xie, 2020), فرآیند طراحی مربوطه بر اساس یک کنترل چندحلقه‌ای است که در آن صرفاً معادلات تحلیلی استفاده شده است. در مقابل، فرآیند طراحی روش پیشنهادی مبتنی بر یک کنترل چندحلقه‌ای همراه با معادلات تحلیلی و محاسبات عددی است. به طور کلی، این روش‌ها ساده هستند زیرا می‌توانند از کنترل تک حلقه‌ای یا معادلات تحلیلی استفاده کنند. فرآیند طراحی در (Akhavan, 2020) نیز بر اساس کنترل چندحلقه‌ای است، اما فقط محاسبات عددی اتخاذ شده است که سطح پیچیدگی متوسطی دارد. به همین ترتیب، وضعیت مشابهی را می‌توان در (Xie, 2020) یافت، با این حال یک سنسور اضافی در آن استفاده شده است. در مقایسه با روش‌های موجود، روش پیشنهادی نه تنها خاصیت میرایی را تا فرکانس  $\omega/2$  با استحکام بالا در برابر تغییرات پارامتر فیلتر LCL محقق می‌سازد، بلکه ساختار کنترلی آن ساده بوده و از لحاظ هزینه سیستم کنترلی نیز مقرون به صرفه است.

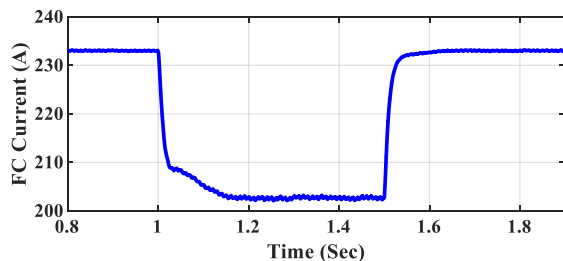
## ۵- نتایج شبیه‌سازی

سیستم بهساز توان پیل سوختی جهت بررسی برای توان خروجی حدود  $9/1$  کیلوواتی شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. ولتاژ تولیدی پیل سوختی با استفاده از مبدل بوست افزایش یافته است. سپس با استفاده از اینورتر متصل به شبکه با فیلتر LCL انرژی تولیدی آن به

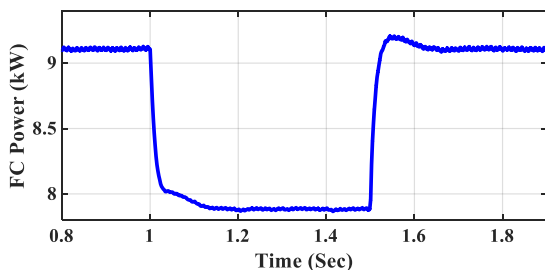
۲۲ جریان خروجی اینورتر به ازای سوخت متفاوت و در شکل ۲۴ توان تزریقی سیستم بهساز توان پیل سوختی به شبکه برای بازه زمانی کاهش و افزایش سوخت نمایش داده شده است. مطابق این دو شکل، میزان جریان و توان تزریقی به شبکه مطابق با تغییرات سوخت کاهش و افزایش داشته و در بازه زمانی کوتاهی به شرایط پایدار جدید رسیده است که بیانگر عملکرد دینامیکی مناسب سیستم کنترل پیشنهادی می‌باشد.

#### ۶- نتیجه گیری

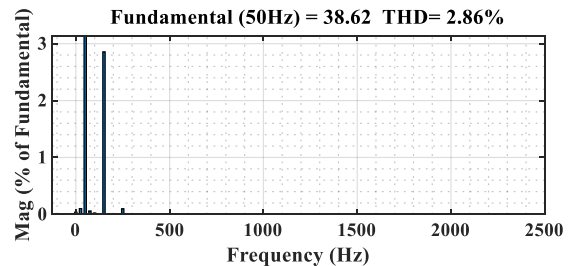
در این مقاله برای بهبود کیفیت جریان تزریقی سیستم بهساز توان پیل سوختی متصل به شبکه از فیلتر LCL و کنترل مناسب برای آن و همچنین برای عملکرد پایدار و انفعالی سیستم از روش بهبودیافته شکل‌دهی امیدانس‌های مجازی استفاده گردید. برای این منظور امیدانس خروجی اینورتر به دو عنصر غیرفعال و فعال با اتصال سری به یکدیگر تجزیه گردید. برای خنثی کردن عنصر فعال یک امیدانس سری مجازی که توسط فیدبک جریان شبکه پیاده‌سازی می‌شود استفاده گردید. برای کاهش تأثیر نامطلوب امیدانس سری مجازی بر بهره حلقه فرکانس پایین و حاشیه فاز سیستم، عملکرد فیدبک مربوطه از طریق قرار دادن یک فیلتر بالاگذر اصلاح گردید. در همین حال، یک امیدانس موازی مجازی که توسط پیشخور ولتاژ نقطه اتصال مشترک پیاده‌سازی می‌شود، برای افزایش پایداری و عملکرد انفعالی سیستم معرفی گردید. روش کنترل پیشنهادی بر روی سیستم بهساز توان پیل سوختی متصل به شبکه اعمال شده و عملکرد سیستم در شرایط پایدار و همچنین با اعمال اغتشاش تغییر شدت سوخت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی بیانگر کیفیت بسیار مناسب جریان تزریقی به شبکه و همچنین پایداری و عملکرد انفعالی سیستم تحت بررسی به ازای تغییر قابل توجه در امیدانس شبکه ضعیف تحت بررسی می‌باشد.



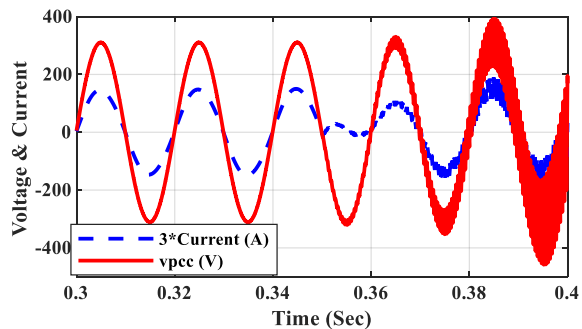
شکل ۱۹- جریان خروجی پیل سوختی



شکل ۲۰- توان خروجی پیل سوختی

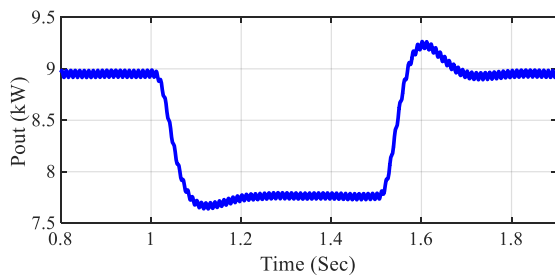


شکل ۱۷- THD جریان تزریقی به شبکه

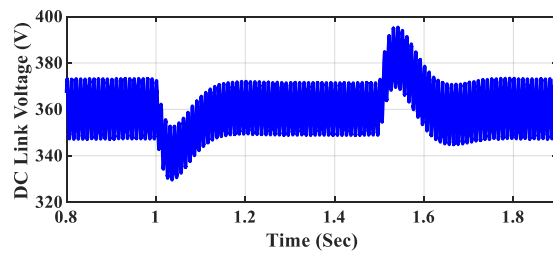


شکل ۱۸- ولتاژ و جریان شبکه با و بدون حضور امیدانس‌های مجازی

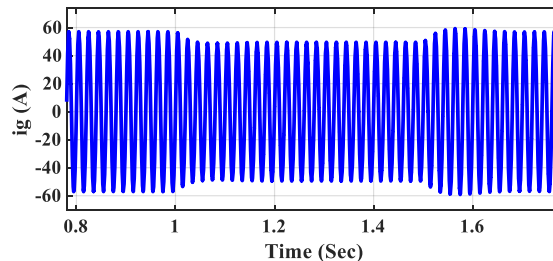
شکل ۱۹ جریان خروجی پیل سوختی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل با کاهش سوخت به مقدار ۲۰ درصد در لحظه ۱ ثانیه، جریان تولیدی پیل سوختی از ۲۳۳ آمپر به ۲۰۳ آمپر کاهش یافته و پس از حدود ۰/۱۸ ثانیه به شرایط پایدار رسیده است. پس از افزایش مجدد سوخت به مقدار ۲۰ درصد، جریان تولیدی پیل سوختی در بازه زمانی حدود ۱/۵ ثانیه مجدداً شرایط پایدار جدید با جریان ۲۳۳ آمپر را بازیابی نموده است. در شکل ۲۰ توان تولیدی پیل سوختی نمایش داده شده است. به ازای سوخت کامل، این سیستم حدود ۹/۱ kW توان تولید می‌کند که با کاهش سوخت به حدود ۷/۹ kW کاهش یافته و با افزایش مجدد سوخت با دینامیک مناسب به مقدار قبلی بازگشته است. ولتاژ خازن لینک DC واسط بین مبدل DC-DC و اینورتر متصل به شبکه نقش تعادلی در تزریق توان به شبکه ایفا می‌کند. با کنترل ولتاژ این خازن، می‌توان توان تولیدی پیل سوختی را به شبکه انتقال داد. در لحظه ۱ ثانیه و با کاهش سوخت، توان تولیدی پیل سوختی کاهش یافته و نتیجه این امر با کاهش ولتاژ خازن لینک DC مشخص شده است. کنترل کننده PI لینک DC با کاهش جریان مرجع اینورتر به این موضوع عکس‌العمل نشان داده و سعی می‌کند ولتاژ لینک DC را در مقدار مرجع قبلی تثبیت کند. در بازه زمانی حدود ۰/۰۵ ثانیه این امر محقق شده و ولتاژ خازن لینک DC تثبیت شده است. بنابراین جریان مرجع تزریقی به شبکه در این شرایط کاهش یافته و خود را با جریان و توان کاهش یافته پیل سوختی وفق داده است. پس از افزایش مجدد سوخت در لحظه ۱/۵ ثانیه، توان تزریقی از پیل سوختی به خازن لینک DC افزایش یافته و به طور لحظه‌ای ولتاژ لینک DC افزایش می‌یابد. این بار کنترل کننده PI لینک DC جریان مرجع اینورتر را افزایش می‌دهد تا انرژی مازاد ذخیره شده در خازن را به شبکه منتقل کرده و ولتاژ خازن را در مقدار مرجع قبلی تثبیت کند. پس از حدود ۰/۱۵ ثانیه، ولتاژ خازن لینک DC و جریان تزریقی به شبکه به شرایط پایدار می‌رسند. در شکل ۲۱ ولتاژ خازن لینک DC نمایش داده شده است. مطابق این شکل، ولتاژ لینک DC روی ۳۶۰ ولت نوسان ناچیز ۵ ولتی دارد و سیستم کنترل ولتاژ لینک DC به نحو مطلوبی عمل می‌کند. در شکل



شکل ۲۴- توان تزریقی پیل سوختی به شبکه به ازای سوخت متفاوت



شکل ۲۱- ولتاژ لینک DC



شکل ۲۲- جریان شبکه به ازای سوخت متفاوت

#### منابع

- Akhavan, A., Vasquez, J.C. and Guerrero, J.M., ۲۰۲۰. A simple method for passivity enhancement of current controlled grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۸), pp.۷۷۳۵-۷۷۴۱.
- Akhavan, A., Vasquez, J.C. and Guerrero, J.M., ۲۰۲۰. A simple method for passivity enhancement of current controlled grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۸), pp.۷۷۳۵-۷۷۴۱.
- Akhavan, A., Mohammadi, H.R., Vasquez, J.C. and Guerrero, J.M., ۲۰۱۹. Passivity-based design of plug-and-play current-controlled grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۲), pp.۲۱۳۵-۲۱۵۰.
- Chen, X., Zhang, Y., Wang, S., Chen, J. and Gong, C., ۲۰۱۶. Impedance-phased dynamic control method for grid-connected inverters in a weak grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(۱), pp.۲۷۴-۲۸۳.
- Cespedes, M. and Sun, J., ۲۰۱۲, February. Impedance shaping of three-phase grid-parallel voltage-source converters. In *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. ۷۵۴-۷۶۰). IEEE.
- Cao, Y., Yao, M. and Sun, X., ۲۰۲۳. An Overview of Modelling and Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles. *Applied Sciences*, 13(۱۰), p.۵۹۴۷.
- Hans, F., Schumacher, W., Chou, S.F. and Wang, X., ۲۰۱۸. Passivation of current-controlled grid-connected VSCs using passivity indices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(۱۱), pp.۸۹۷۱-۸۹۸۰.
- Harnefors, L., Bongiorno, M. and Lundberg, S., ۲۰۰۷. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters. *IEEE transactions on industrial electronics*, 54(۶), pp.۳۳۲۳-۳۳۳۴.
- Harnefors, L., Yepes, A.G., Vidal, A. and Doval-Gandoy, J., ۲۰۱۴. Passivity-based controller design of grid-connected VSCs for prevention of electrical resonance instability. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(۲), pp.۷۰۲-۷۱۰.
- Harnefors, L., Wang, X., Yepes, A.G. and Blaabjerg, F., ۲۰۱۵. Passivity-based stability assessment of grid-connected VSCs—An overview. *IEEE Journal of emerging and selected topics in Power Electronics*, 4(۱), pp.۱۱۶-۱۲۵.
- Harnefors, L., Yepes, A.G., Vidal, A. and Doval-Gandoy, J., ۲۰۱۴. Passivity-based stabilization of resonant current controllers with consideration of time delay. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(۱۲), pp.۶۲۶۰-۶۲۶۳.

- He, Y., Wang, X., Ruan, X., Pan, D. and Qin, K., ۲۰۲۰. Hybrid active damping combining capacitor current feedback and point of common coupling voltage feedforward for LCL-type grid-connected inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(۲), pp. ۲۳۷۳-۲۳۸۳.
- He, Y., Wang, X., Ruan, X., Pan, D., Xu, X. and Liu, F., ۲۰۱۹. Capacitor-current proportional-integral positive feedback active damping for LCL-type grid-connected inverter to achieve high robustness against grid impedance variation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(۱۲), pp. ۱۲۴۲۳-۱۲۴۳۶.
- He, Y., Wang, X., Pan, D., Ruan, X. and Su, G., ۲۰۲۱. An ignored culprit of harmonic oscillation in LCL-type grid-connected inverter: Resonant pole cancelation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(۱۲), pp. ۱۴۲۸۲-۱۴۲۹۴.
- Liu, T., Liu, Z., Liu, J. and Liu, Z., ۲۰۱۶, September. Virtual impedance-based active damping for LCL resonance in grid-connected voltage source inverters with grid current feedback. In *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. ۱-۸). IEEE.
- Lu, M., Al-Durra, A., Mueeen, S.M., Leng, S., Loh, P.C. and Blaabjerg, F., ۲۰۱۷. Benchmarking of stability and robustness against grid impedance variation for LCL-filtered grid-interfacing inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(۱۰), pp. ۹۰۳۳-۹۰۴۶.
- Rodriguez-Diaz, E., Freijedo, F.D., Guerrero, J.M., Marrero-Sosa, J.A. and Dujic, D., ۲۰۱۸. Input-admittance passivity compliance for grid-connected converters with an LCL filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(۲), pp. ۱۰۸۹-۱۰۹۷.
- Wang, X., He, Y., Pan, D., Zhang, H., Ma, Y. and Ruan, X., ۲۰۲۱. Passivity enhancement for LCL-filtered inverter with grid current control and capacitor current active damping. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(۴), pp. ۳۸۰۱-۳۸۱۲.
- Wang, C., Wang, X., He, Y., Pan, D., Zhang, H., Ruan, X. and Chen, X., ۲۰۲۲. Passivity-Oriented Impedance Shaping for LCL-Filtered Grid-Connected Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(۹), pp. ۹۰۷۸-۹۰۹۰.
- Wang, X., Blaabjerg, F. and Loh, P.C., ۲۰۱۷. Passivity-based stability analysis and damping injection for multiparalleled VSCs with LCL filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(۱۱), pp. ۸۹۲۲-۸۹۳۰.
- Wang, C., Wang, X., He, Y., Pan, D., Zhang, H., Ruan, X. and Chen, X., ۲۰۲۲. Passivity-Oriented Impedance Shaping for LCL-Filtered Grid-Connected Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(۹), pp. ۹۰۷۸-۹۰۹۰.
- Wang, X. and Blaabjerg, F., ۲۰۱۸. Harmonic stability in power electronic-based power systems: Concept, modeling, and analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(۳), pp. ۲۸۰۸-۲۸۷۰.
- Wang, X., Li, Y.W., Blaabjerg, F. and Loh, P.C., ۲۰۱۴. Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(۱۲), pp. ۷۰۱۹-۷۰۳۷.
- Wu, W., Peng, L., Qi, Y., Liu, Q., Huang, Z., Dong, F., Chen, M. and Wang, B., ۲۰۱۷, October. An improved active damping method with grid-side current feedback to maximize damping ratio for LCL-type grid-connected inverter. In *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. ۵۶۰۷-۵۶۱۱). IEEE.
- Wu, H. and Wang, X., ۲۰۲۰. Virtual-flux-based passivation of current control for grid-connected VSCs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۱۲), pp. ۱۲۶۷۳-۱۲۶۷۷.
- Xun, Q., Liu, Y., Huang, X., Grunditz, E.A., Zhao, J. and Zhao, N., ۲۰۲۰. Drive cycle energy efficiency of fuel cell/supercapacitor passive hybrid vehicle system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(۱), pp. ۸۹۴-۹۰۳.
- Xu, J., Xie, S. and Tang, T., ۲۰۱۳. Active damping-based control for grid-connected LCL-filtered inverter with injected grid current feedback only. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(۹), pp. ۴۷۴۶-۴۷۵۸.
- Xu, J., Xie, S., Zhang, B. and Qian, Q., ۲۰۱۸. Robust grid current control with impedance-phase shaping for LCL-filtered inverters in weak and distorted grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(۱۲), pp. ۱۰۲۴۰-۱۰۲۵۰.
- Xie, C., Li, K., Zou, J. and Guerrero, J.M., ۲۰۱۹. Passivity-based stabilization of LCL-type grid-connected inverters via a general admittance model. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۶), pp. ۶۶۳۶-۶۶۴۸.

- Xie, C., Li, K., Zou, J., Liu, D. and Guerrero, J.M., ۲۰۲۰. Passivity-based design of grid-side current-controlled LCL-type grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۹), pp.۹۸۱۳-۹۸۲۳.
- Yuan, X., Liu, Y. and Bucknall, R., ۲۰۲۰. A novel design of a solid oxide fuel cell-based combined cooling, heat and power residential system in the UK. *IEEE Transactions on industry applications*, 57(۱), pp.۸۰۵-۸۱۳.
- Yao, W., Yang, Y., Zhang, X., Blaabjerg, F. and Loh, P.C., ۲۰۱۶. Design and analysis of robust active damping for LCL filters using digital notch filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(۳), pp.۲۳۶۰-۲۳۷۵.
- Yang, D., Ruan, X. and Wu, H., ۲۰۱۴. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(۱۱), pp.۵۷۹۵-۵۸۰۵.
- Yang, Z., Shah, C., Chen, T., Teichrib, J. and De Doncker, R.W., ۲۰۲۰. Virtual damping control design of three-phase grid-tied PV inverters for passivity enhancement. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(۶), pp.۶۲۵۱-۶۲۶۴.
- Zhou, J., Feng, C., Su, Q., Jiang, S., Fan, Z., Ruan, J., Sun, S. and Hu, L., ۲۰۲۲. The Multi-Objective Optimization of Powertrain Design and Energy Management Strategy for Fuel Cell-Battery Electric Vehicle. *Sustainability*, 14(۱۰), p.۶۳۲۰.
- Zhang, H., Ruan, X., Lin, Z., Wu, L., Ding, Y. and Guo, Y., ۲۰۲۰. Capacitor voltage full feedback scheme for LCL-type grid-connected inverter to suppress current distortion due to grid voltage harmonics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(۳), pp.۲۹۹۶-۳۰۰۶.
- Zou, C., Liu, B., Duan, S. and Li, R., ۲۰۱۴. Influence of delay on system stability and delay optimization of grid-connected inverters with LCL filter. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(۳), pp.۱۷۷۵-۱۷۸۴.
- Zhou, L., Chen, Y., Luo, A., Guerrero, J.M., Zhou, X., Chen, Z. and Wu, W., ۲۰۱۶. Robust two degrees-of-freedom single-current control strategy for LCL-type grid-connected DG system under grid-frequency fluctuation and grid-impedance variation. *IET Power Electronics*, 9(۱۴), pp.۲۶۸۲-۲۶۹۱.
- .
- Zhu, K., Sun, P., Zhou, L., Du, X. and Luo, Q., ۲۰۱۹. Frequency-division virtual impedance shaping control method for grid-connected inverters in a weak and distorted grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۸), pp.۸۱۱۶-۸۱۲۹.
- Zhao, J., Xie, C., Li, K., Zou, J. and Guerrero, J.M., ۲۰۲۱. Passivity-oriented design of LCL-type grid-connected inverters with Luenberger observer-based active damping. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(۳), pp.۲۶۲۵-۲۶۳۵.

# Design and analysis of robust performance of fuel cell power conditioner system connected to weak grid using virtual impedance shaping

Rasoul Akbari<sup>۱</sup>; Majid Hoseinpour<sup>\*۲</sup>; Elham Seyfi<sup>۳</sup>; Mahdi Shahparasti<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> Ph.D student, Faculty of Engineering, University of Mohagheg Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>۲\*</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Mohagheg Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>۳</sup> MSc, Faculty of Engineering, University of Mohagheg Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>۴</sup> Assistant Professor, Faculty of Technology and Innovation, Vaasa University, Vaasa, Finland

## Abstract:

Grid-connected inverters play a crucial role in transmitting power from distributed production systems and renewable sources to the grid. However, these inverters often generate current harmonics due to high-frequency switching and DC link ripple. To address these issues, various filters, including the LCL filter, are employed. Yet, in situations with variable network impedance and LCL filter resonance in weak networks, instability can occur. This paper focuses on improving the power quality of grid-connected Fuel Cell using LCL filters, primarily through a current sensor and virtual impedance shaping. The paper divides the output impedance of the Fuel Cell power optimization system into an active and passive part. It neutralizes the active component by introducing a series virtual impedance and counteracts its adverse effects with parallel virtual impedance. The design process for both series and parallel virtual impedance is elaborated, and the system's sensitivity is thoroughly analyzed. To validate the proposed approach, extensive simulations have been carried out using MATLAB software. The simulations demonstrate the robust and precise performance of the control system in effectively injecting the maximum power generated by the Fuel Cell into the grid. Additionally, they showcase the high-quality current being injected into the grid and the system's capacity to maintain stability, even in a weak network environment.

## Introduction

The rapid reduction of fuel reserves and the harmful effects of burning fossil fuels cannot be ignored. The fact that fossil fuels cause environmental concerns such as greenhouse gas emissions, atmospheric effects, and public health has drawn the attention of researchers to replace fossil fuels with renewable energy sources that are sustainable, environmentally friendly, and clean. Renewable energy sources include: fuel cell, wind turbines, geothermal, fuel cells, Among the renewable sources, fuel cells are a suitable option for various applications due to their simple use, high reliability, low maintenance cost, and being silent (Yuan, ۲۰۲۰).

The production voltage level of the fuel cell for applications connected to the grid is low. Therefore, a DC-DC converter is used to increase the output voltage level of the fuel cell. A DC-AC converter is also used to connect the fuel cell to the network. In practical applications, LCL-type grid-tied inverters have been widely utilized due to their superior harmonic mitigation capabilities and compact size. For an LCL-filtered grid-connected inverter, active damping based on network current feedback can ensure the desired bandwidth and good robustness. However, the performance of the inverter is seriously jeopardized by non-ideal conditions at the point of common coupling (PCC), including network voltage distortions and variable network impedance (Zhu, ۲۰۱۹). Active damping based on network current feedback may not work well for wide variations in network impedance. Therefore, in (Xu, ۲۰۱۸), the robustness of this control method is discussed, and its relationships with system parameters are extracted and established through mathematical equations.

Impedance shaping based on virtual impedance is an effective and enhanced method to control grid-connected inverters in weak and distorted networks (Zhu, ۲۰۱۹, Chen, ۲۰۱۷). In (Wang, ۲۰۱۵), an impedance shaping strategy with parallel and series virtual impedances is proposed. In fact, shaping parallel virtual impedance is equivalent to the voltage feed-forward strategy at the PCC, ensuring system robustness against network disturbances (Zhu, ۲۰۱۹, Wang, ۲۰۱۵).

In a majority of the previously discussed methods, the initial step involved the introduction of a specific control approach, after which impedance shaping of the inverter output was examined within the framework of that approach. This approach resulted in a lack of generality. To address this limitation, the present paper introduces an impedance shaping method that is rooted in a tangible physical concept for a Fuel Cell power injection system. For this purpose, a series virtual impedance has been designed using network current feedback to eliminate the active component. In the feedback path, a high-pass filter has been used to avoid undesirable effects of the series virtual impedance at lower frequencies gain and system phase margin. Since the use of series virtual impedance may jeopardize the control system's stability around the resonance frequency due to changes in LCL filter parameters, a parallel virtual impedance has been employed using voltage feedback at the PCC to address this issue. Finally, a systematic and uncomplicated design of control system parameters has been put forth for enhancing the Fuel Cell power injection system. This proposed design has been compared to existing methods in terms of the passive performance of the grid-connected inverter.

### System modeling and passive performance characteristics

Figure ۱ depicts the schematic of the Fuel Cell power injection system connected to the grid, incorporating an LCL filter. In this figure, the inductor  $L_1$  is on the inverter side, the inductor  $L_2$  is on the grid side, and the  $C$  signifies the filter capacitor. The network at the PCC is characterized as an ideal voltage source  $V_g$  coupled to a network impedance  $Z_g$ . The inductance of power lines and transformers, as well as the capacitance of power factor correction circuits, are typically indicative of  $Z_g$  (C. Zou, ۲۰۱۴), which is identified by  $C_g$  and  $L_g$ . Within the components of the filter and network impedance, there are parasitic resistances that provide a degree of passive damping for system stability. Since considering them complicates the analysis and design of control parameters, in most research, parasitic resistances are ignored in the analysis and control parameter design (Akhavan, ۲۰۲۰, Rodriguez-Diaz, ۲۰۱۹)-( Harnefors, ۲۰۰۷). To implement closed-loop control, the network current, denoted as  $i_g$ , is measured. The PCC voltage,  $V_{PCC}$ , is measured for synchronizing the current with the grid voltage through the phase locked loop (PLL), where  $\theta$  represents the tracking angle. The angle  $\theta$  is combined with the reference current magnitude  $I^*$  to form the reference current signal,  $i_{ref}$ . Subsequently, the errors are transmitted to the current controller  $G_c$  for the generation of modulation signals  $V_M$ . Lastly, power-switching gates signal are produced through a pulse width modulation (PWM) modulator.

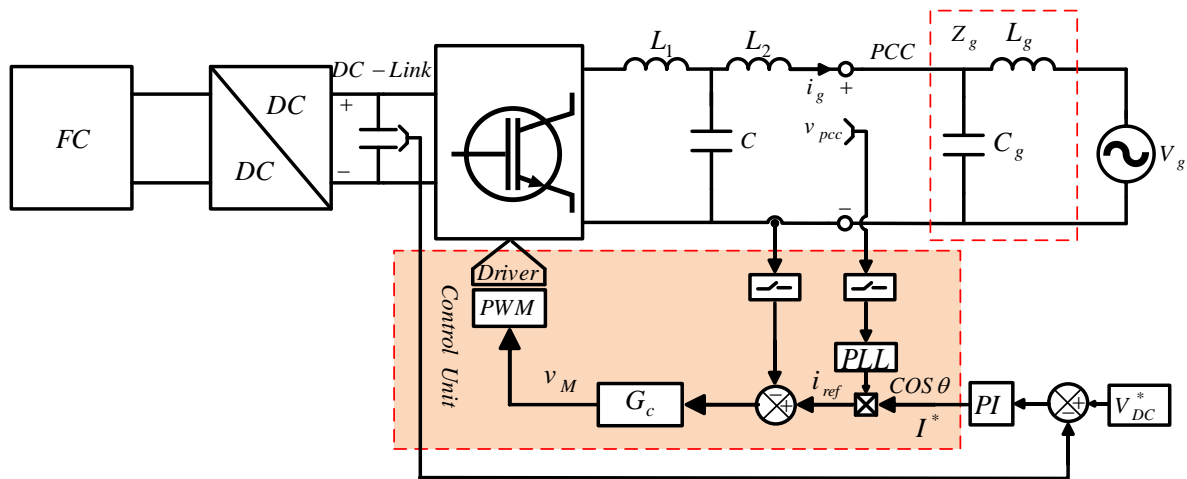


Figure ۱. Configuration of grid-connected Fuel Cell power optimization system with LCL filter

### Simulation results

The power conditioning system of the Fuel Cell has been simulated and evaluated for a ۱۰ kW output power. The output voltage of the Fuel Cell is boosted using a boost converter. The energy produced by the system is then injected into the grid using an inverter connected to an LCL filter. The power conditioning system of the Fuel Cell is analyzed with and without the presence of virtual impedances, both series and parallel.

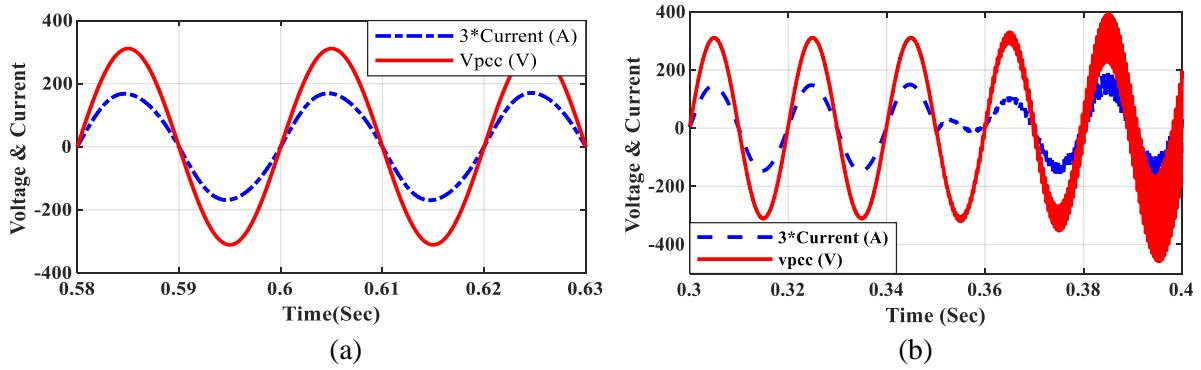


Figure ۲- (a) Output voltage and current of the grid-connected Fuel Cell in the presence of virtual impedances (b) Grid voltage and current with and without the presence of virtual impedances

## Conclusion

In this study, an approach for the enhancement of grid-connected Fuel Cell power conditioning systems is presented. The utilization of an LCL filter and a tailored control method is employed to improve the quality of the injected current. In parallel, stability and passive system performance are ensured through the application of an advanced virtual impedance shaping technique. The inverter output impedance is partitioned into two essential components, one passive and the other active, connected in series. To nullify the active component, a virtual series impedance is employed, guided by grid current feedback. To mitigate any potential adverse influences on the system's low-frequency loop gain and phase margin, a high-pass filter modification is incorporated into the feedback function. Simultaneously, a parallel virtual impedance is introduced through PCC voltage feedback, augmenting system stability and passive performance. The proposed control methodology has been applied to the Fuel Cell's power conditioning system, linked to the grid. Comprehensive evaluations have been carried out under stable conditions and simulated disturbances arising from perturbing the amount of fuel. The simulation results consistently affirm the high quality of the injected current into the grid. Notably, the system retains its stability and passive performance, even when confronted with substantial variations in the network impedance. These results underscore the effectiveness and resilience of the approach in optimizing Fuel Cell power conditioning system performance in grid-connected scenarios.

## References:

- Akhavan, A., Mohammadi, H.R., Vasquez, J.C. and Guerrero, J.M., ۲۰۱۹. Passivity-based design of plug-and-play current-controlled grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۲), pp.۲۱۳۰-۲۱۵۰.
- Chen, X., Zhang, Y., Wang, S., Chen, J. and Gong, C., ۲۰۱۶. Impedance-phased dynamic control method for grid-connected inverters in a weak grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(۱), pp.۲۷۴-۲۸۳.
- Harnefors, L., Bongiorno, M. and Lundberg, S., ۲۰۰۷. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters. *IEEE transactions on industrial electronics*, 54(۶), pp.۳۳۲۳-۳۳۳۴.
- Rodriguez-Diaz, E., Freijedo, F.D., Guerrero, J.M., Marrero-Sosa, J.A. and Dujic, D., ۲۰۱۸. Input-admittance passivity compliance for grid-connected converters with an LCL filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(۲), pp.۱۰۸۹-۱۰۹۷.
- Yuan, X., Liu, Y. and Bucknall, R., ۲۰۲۰. A novel design of a solid oxide fuel cell-based combined cooling, heat and power residential system in the UK. *IEEE Transactions on industry applications*, 57(۱), pp.۸۰۵-۸۱۳.
- Wang, X., Li, Y.W., Blaabjerg, F. and Loh, P.C., ۲۰۱۴. Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(۱۲), pp.۷۰۱۹-۷۰۳۷.
- Xu, J., Xie, S., Zhang, B. and Qian, Q., ۲۰۱۸. Robust grid current control with impedance-phase shaping for LCL-filtered inverters in weak and distorted grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(۱۲), pp.۱۰۲۴۰-۱۰۲۵۰.

- Yang, D., Ruan, X. and Wu, H., ۲۰۱۴. Impedance shaping of the grid-connected inverter with LCL filter to improve its adaptability to the weak grid condition. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(۱۱), pp.۵۷۹۵-۵۸۰۵.
- Zhu, K., Sun, P., Zhou, L., Du, X. and Luo, Q., ۲۰۱۹. Frequency-division virtual impedance shaping control method for grid-connected inverters in a weak and distorted grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۸), pp.۸۱۱۶-۸۱۲۹.
- Zhu, K., Sun, P., Zhou, L., Du, X. and Luo, Q., ۲۰۱۹. Frequency-division virtual impedance shaping control method for grid-connected inverters in a weak and distorted grid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(۸), pp.۸۱۱۶-۸۱۲۹.