



دومین کنگره بین المللی علوم و مهندسی

آلمان - هامبورگ

اسفند ماه 1397

جبران سازی نامتعادلی شبکه توزیع با استفاده از بکارگیری

سلول های خورشیدی درون خطی

کامران حسن پوری باعصمت^{1*}، نوید روزبهانی²، دانیال بختیاری³

1- شرکت مهندسی قدس نیرو، تهران، ایران kamran.baesmat@gmail.com

2- شرکت نیرو آزما پیام، تهران، ایران navid.roozbahani1990@gmail.com

3- شرکت سنگ آهن گهر زمین، سیرجان، ایران daniyal_0098@yahoo.com

چکیده

صنعت برق یکی از حیاتی ترین صنایع یک کشور به حساب می آید. در این میان شبکه توزیع انرژی الکتریکی محل تلاقی مشترکین صنعت برق می باشد و اشکالات سیستم توزیع در این صنعت از دید مصرف کنندگان، مشکل کلیه صنعت برق قلمداد خواهد شد. توسعه روز افزون، عدم پیش بینی صحیح این روند و عقب ماندگی تکنولوژی همواره مشکلاتی را در سیستم توزیع انرژی الکتریکی به همراه داشته است. به همین علت بر آن شدم تا تاثیر سلول های خورشیدی درون خطی را برای رفع نامتعادلی شبکه توزیع سنجیده و شرایط آن را بررسی نمایم.

واژه های کلیدی: PCC, IGBT, Hysteresis, PI-Fuzzy, جبران سازی

1- مقدمه

امروزه توجه زیادی به مسائل کیفیت توان می شود، کیفیت توان شامل چالش های مختلفی است که یکی از آن ها پدیده نامتعادلی شبکه می باشد. نامتعادلی شبکه توزیع موجب اثرات نامطلوبی روی سیستم می شود که افزایش تلفات و عدم عملکرد صحیح تجهیزات از آن جمله می باشد. از سوی دیگر نیاز گسترده به انرژی و عوامل ریست محیطی و رویکرد هایی نظیر کاهش تلفات باعث می گردد تا گرایش به استفاده از انرژی های نو نظیر انرژی خورشیدی و بادی مورد توجه قرار گیرد. سلول های خورشیدی امروزه بطور فراوان در سطح شبکه توزیع در راستای تولید توان مشترکین سطح شبکه توزیع در راستای تولید توان مشترکین سطح شبکه توزیع مورد استفاده قرار میگیرند. در این مقاله امکان بکارگیری سلول های خورشیدی به صورت درون خطی میان دو فیدر بطوری که همزمان با تولید توان قادر باشد نامتعادلی را جبران کند مورد بررسی قرار گرفته است.

2- سوابق مربوط

از آنجا که نامتعادلی در شبکه موجب اثرات نامطلوبی می شود لذا تحقیقات زیادی در مورد جبران سازی آن صورت گرفته است. در [1-4] تحقیقاتی در مورد عوامل ایجاد نامتعادلی در جبران سازی آن صورت گرفته است. در [1] اشاره شده است که بارهای تکفاز عامل اصلی نامتعادلی هستند. در [2-4] به جبران سازی نامتعادلی با استفاده از فیلترهای اکتیو سری پرداخته شده است. در [5-9] تحقیقات راجع به بکارگیری فیلترهایی شنت بررسی شده است. از سوی دیگر حضور DG ها (تولیدات پراکنده) در راستای تأمین بخشی از انرژی شبکه توزیع اجتناب ناپذیر شده است. DG ها از طریق اینورتر به شبکه وصل می شوند و با کنترل اینورتر می توان توان اکتیو و رکتیو خروجی DG و تزریق شده به شبکه را کنترل کرد. در [10-11] به چندین روش



دومین کنگره بین المللی علوم و مهندسی

آلمان - هامبورگ

اسفند ماه 1397

کنترلی اینورترها در تولیدات پراکنده پرداخته شده است. در [12-15] چند روش کنترلی اینورترهای موجود در تولیدات پراکنده با رویکرد جبران سازی نامتعادلی ولتاژ بررسی شده است. روش کنترلی اشاره شده در [12] و [13] مبتنی بر بکارگیری دو اینورتر طراحی شده است. یکی از اینورترها سری و دیگری به صورت موازی به شبکه اتصال دارد. اینورتر موازی وظیفه کنترل توان اکتیو تولیدی DG را بر عهده دارد و اینورتر سری با تزریق ولتاژ و جریان ناتعادلی ولتاژ شبکه را جبران می کند. با همین رویکرد یک ساختار جدیدی برای سلول های خورشیدی ارائه شده است که به واسطه اتصال بین دو فیدر از طریق یک اینورتر سری و دیگری موازی بتوان ضمن کنترل توان تولیدی سلول خورشیدی به جبران سازی ناتعادلی ولتاژ پرداخت.

این مقاله به صورت توأما دو هدف را دنبال می کند:

1- بحث تولید توان در سطح شبکه توزیع با استفاده از سلول های خورشیدی (P.V)

2- بکارگیری سلول های خورشیدی با آرایش درون خطی جهت جبران سازی ناتعادلی شبکه توزیع در این راستا باید یک سیستم کنترل مناسب طراحی و بر روی سلول های خورشیدی اعمال شود.

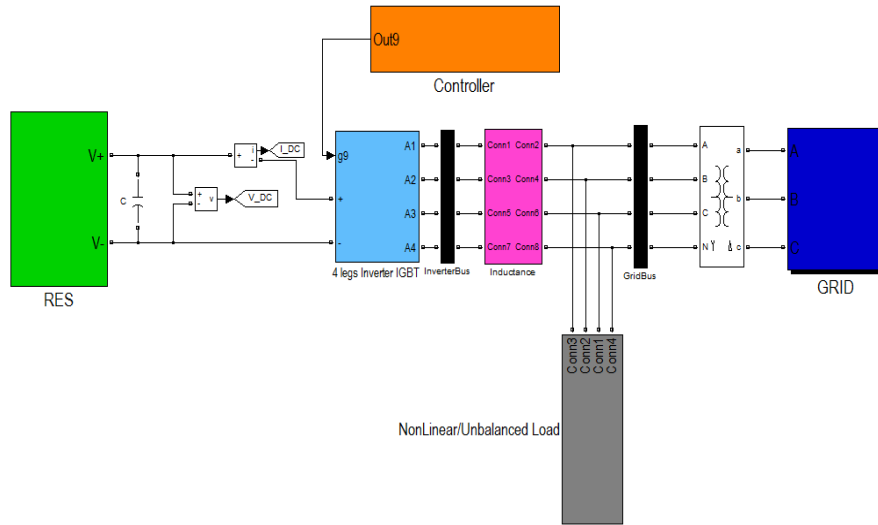
تلفات قدرت در شبکه فشار ضعیف شامل دو دسته تلفات قدرت در فازها و تلفات قدرت در سیم نول می باشد. با فرض ثابت بودن مجموع جریان سه فاز، تلفات قدرت در فازها در حالت عدم تعادل باربیش از تلفات در حالت بار بوده که به آن تلفات در نول هم اضافه می شود و با توجه به این امر که اکثراً مقاطع سیم ها در نول نصف مقاطع سیم فازها و بنابراین مقاومت اهمی سیم نول حدود دو برابر مقاومت سیم فازها می باشد، تلفات حتی در حالت جریان های عبوری کم، باز هم قابل توجه است.

افت ولتاژ در اثر نامتعادلی: حتی با فرض این که سیم های فاز در شبکه مقاطع یکسان و در نتیجه امپدانس مساوی داشته باشند، در اثر عبور جریان نابرابر، سیم های فاز افت ولتاژ متفاوتی داشته و در نتیجه دارای ولتاژ نامتعادل در طرف مصرف کننده ها بخصوص مصرف کننده های حساس مانند موتورهای سه فاز خواهند بود. این موضوع اثرات نامطلوبی بر مصرف کننده های سه فاز خواهد داشت.

خطرات ناشی از جریان دار شدن سیم نول: با نامتعادل شدن جریان در سیستم سه فاز و عبور جریان از سیم نول، نسبت به زمین دارای ولتاژی می شود که در صورت عبور از حد مجاز از نظر ایمنی نامطلوب بوده و چنانچه مصرف کننده با سیم نول تماس حاصل کند، احتمال برق گرفتگی وجود خواهد داشت. علاوه بر مسائل یاد شده زیاد بودن نامتعادلی بار شبکه باعث وضعیت نامطلوبی در اجزاء دیگر شبکه از جمله ترانسفورماتورها خواهد شد.

3- نحوه ی مدل سازی و تحلیل ریاضی سیستم

سیستم کلی از سه بخش اصلی تشکیل شده است. در سمت راست شکل 1 مشاهده می شود که شبکه توزیع (سه فاز چهار سیمه) توسط یک ترانسفورماتور ستاره (دارای سیم نول) به مثلث یا همان ترانسفورماتور توزیع به شین بینهایت متصل است. این مجموعه، طرف شبکه سیستم را تشکیل داده اند. قسمت پایین شکل، مجموعه ای از بارها بصورت سه فاز و تک فاز دیده می شوند. بارهای استفاده شده در این مجموعه بصورت غیرخطی و نامتعادل هستند. در سمت چپ شکل 1 را مجموعه ی منابع انرژی تجدیدپذیر تشکیل می دهند. منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تبادل انرژی با شبکه توزیع موازی به لینک DC و سپس اینورتر متصل هستند. این سه بخش عمده در نقطه اتصال PCC به یکدیگر متصل هستند.



شکل 1 ساختار کلی سیستم

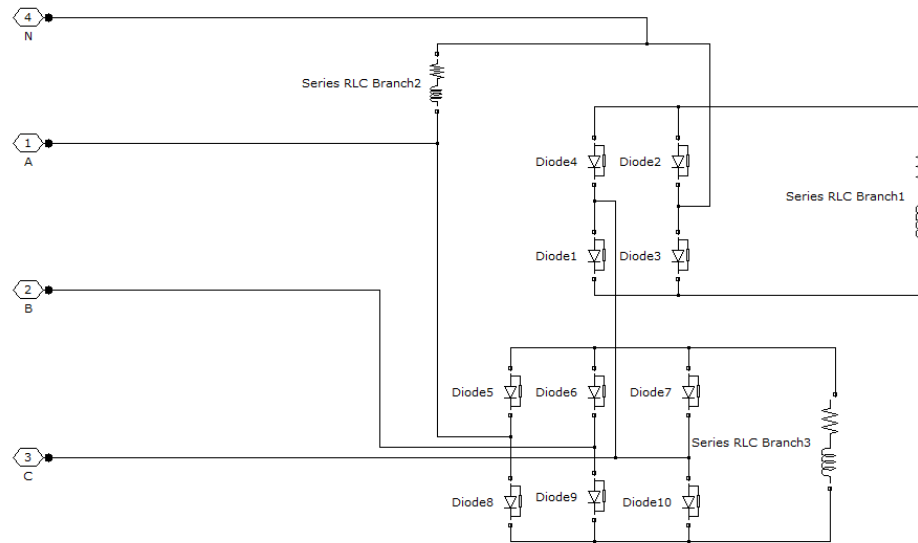
PCC نقطه‌ای است که مشترکین یا بارهای مختلف در شبکه‌های الکتریکی به آن متصل هستند. مطابق استاندارد IEEE-519، PCC نقطه‌ای در دسترس جهت اندازه‌گیری مستقیم مصرف‌کننده‌های الکتریکی و همچنین برای اتصال تجهیزات مختلف می‌باشد. در اکثر موارد PCC به نقطه‌ی اندازه‌گیری و نقطه‌ی قابل دسترسی آسان اطلاق می‌شود.

در حالت کلی، جهت تقلیل اعوجاج هارمونیک، PCC به عنوان نقطه‌ی اندازه‌گیری یا همان نقطه‌ی راحتی کار در نظر گرفته می‌شود. در اکثر موارد، جریان عبوری از نقطه PCC نشان دهنده‌ی مجموع مولفه‌ی اصلی جریان خالص ناشی از بارهای خطی و جریان مولفه‌ی اصلی و اعوجاج یافته ناشی از بارهای غیرخطی است. جریان اعوجاج یافته معمولاً کمتر از مقدار کل جریان مولفه‌ی اصلی (ترکیب دو جریان مذکور) در نقطه‌ی PCC است.

ماهیت بارهای الکتریکی متراکم طی دهه‌ی اخیر دارای تحولات زیادی بوده است. سرعت این تغییرات حتی از کثرت مصرف‌کنندگان سیستم‌های توزیع نیز بالاتر رفته است. با افزایش استفاده از درایوهای سرعت، تجهیزات الکترونیکی و ادوات الکترونیک قدرت، بار مصرفی بیشتر از پیش فعال و غیرخطی شده است. در نتیجه، سطوح اعوجاج هارمونیک در سیستم‌های توزیع در حال افزایش است. یکی از خصوصیات بارهای الکترونیکی ظاهر شدن هارمونیک‌های پنجم و هفتم است. روش‌های موثری (مبدل‌های چندپالسه، ترانسفورماتور تغییر فاز، فیلترهای فعال و غیرفعال و ...) جهت محدود کردن این هارمونیک‌ها به کار رفته است. با افزایش بارهای الکترونیکی متصل مابین فاز و نول، مصرف‌کنندگان شبکه‌ی توزیع به این نکته دست یافتند که هارمونیک غالب، هارمونیک سوم است. این هارمونیک به دلیل جریان نول بالا و بعلاوه ولتاژ نول به زمین، بصورت اساسی در اعوجاج ولتاژ خود را نشان می‌دهد. به دلیل آنکه ترانسفورماتورها قادر نیستند که مولفه‌ی اصلی جریان را به بارهای غیرخطی تغذیه کنند (ترانسفورماتورها محدودکننده‌ی جریان موثر هستند)، بنابراین اعوجاج هارمونیک جریان می‌تواند تاثیر جدی بر روی سیستم‌های توزیع داشته باشد [2].

بارهای الکتریکی مورد استفاده در سیستم اصلی شامل یک بار سه فاز اهمی-سلفی غیرخطی، یک بار تک‌فاز اهمی-سلفی غیرخطی بین فاز C و سیم نول، و یک بار تک‌فاز اهمی-سلفی خطی مابین فاز A و سیم نول می‌باشد. به دلیل آنکه کلیه بارها سه فاز نیستند، قطعاً مجموعه بارهای موجود نامتعادل خواهند شد. نمای کلی بارهای متصل به شبکه چهار سیمه در شکل 3-2 قابل مشاهده است.

در شکل فوق پل دیود تک‌فاز و پل دیود سه‌فاز نشان‌دهنده‌ی غیرخطی بودن بارهای تک‌فاز و سه‌فاز استفاده شده در مدار می‌باشند.



شکل 2 بارهای الکتریکی متصل به شبکه

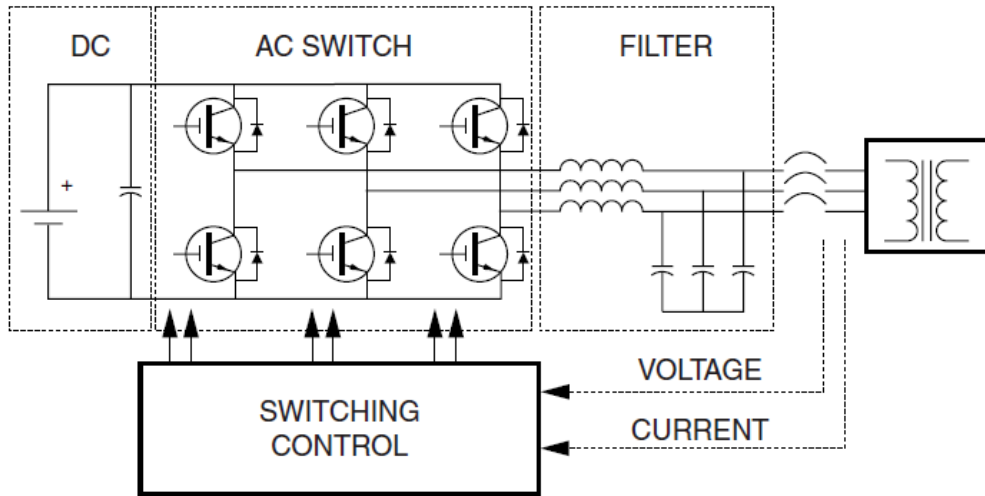
4- اینورتر متصل به شبکه‌ی قدرت و لینک DC

کلیه تکنولوژی‌های منابع انرژی تجدیدپذیر که توان DC یا AC (با فرکانسی متفاوت از فرکانس شبکه) تولید می‌کنند، باید از یک اینورتر الکترونیک قدرت برای اتصال به شبکه استفاده کنند. اینورترهای اولیه مبتنی بر ترستور¹ و هدایت شده توسط طرف AC خط²، برای استفاده در شبکه‌های قدرت نامطلوب هستند. در واقع، تکنولوژی آنالیز هارمونیک از زمانی که تعداد زیادی از آرایه‌های خورشیدی توسط اینورترهای هدایت شده توسط خط به شبکه متصل می‌شدند، گسترش یافت. این اینورترها هارمونیک جریان همانند هارمونیک بارهای غیرخطی تولید می‌کنند. علاوه بر افزودن اعوجاج به خط، تولید توان زیاد در فرکانس هارمونیک، تهدید دیگری از طرف این منابع تولید پراکنده به حساب می‌آید.

شکل 3 اجزای اساسی یک اینورتر متصل به شبکه قدرت (طبق استانداردهای IEEE 929-2000) را نشان می‌دهد [3]. در طرف چپ شکل جریان مستقیم حاصل از تکنولوژی تولید توان DC یا توان AC یکسو شده به اینورتر وارد شده است. استفاده از این سیستم اینورتر در پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها، سیستم‌های فوتوولتائیک و برخی از توربین‌های بادی رایج است.

¹ Thyristor-based

² Line-commutated



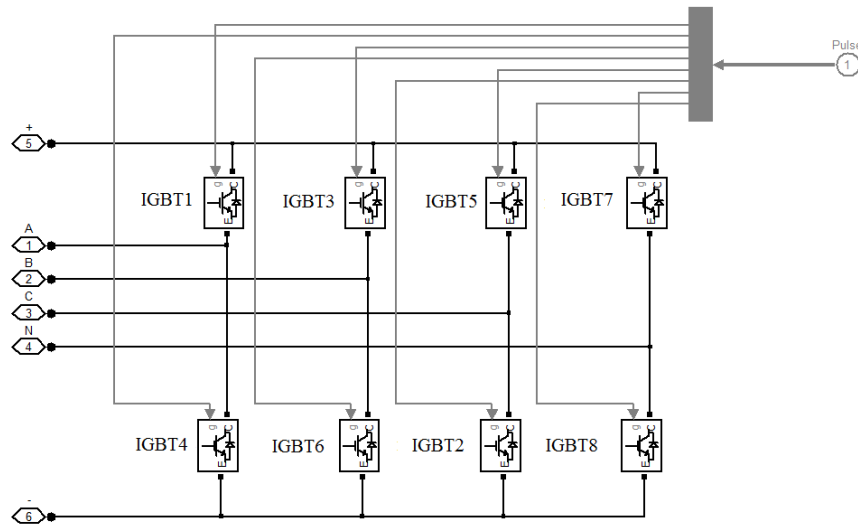
شکل 3 اجزای اساسی یک اینورتر متصل به شبکه قدرت

جهت دستیابی به کنترل بهتر و برطرف کردن مسائل هارمونیک، تکنولوژی اینورترها به مکانیزم کلیدزنی³ تغییر پیدا کرد که نتایج بسیار مقبول تر در اتصال به سیستم‌های الکتریکی را دارا می‌باشد. ولتاژ لینک DC در رنج بالایی بوسیله ترانزیستور دوقطبی گیت مجزا⁴ (IGBT) کلیدزنی می‌شود تا ولتاژ یا جریان مورد نیاز در طرف AC را بوجود آورد. فرکانس کلیدزنی معمولاً 50 تا 100 برابر فرکانس شبکه قدرت است. به دلیل فرکانس کلیدزنی بالا، معمولاً از فیلتر استفاده شده در خروجی اینورتر صرف نظر می‌شود. هرچند که در شرایط رزونانس شبکه‌ی قدرت، ممکن است این فرکانس‌های بالا قابل توجه باشند. مطابق استاندارد IEEE 519-1992 حد مجاز اعوجاج هارمونیک کل 5 درصد است، اما در شرایط خاص که از فیلتر استفاده نمی‌شود و روش کنترلی ضعیف اعمال می‌شود موجب تجاوز از حد استاندارد می‌گردد. با این حال، مقوله‌ی هارمونیک با استفاده از اینورترهای جدید نسبت به اینورترهای پیشین دارای شرایط به مراتب بهتری است. معمولاً از اینورترها برای تولید جریان سینوسی که ولتاژ شبکه‌ی قدرت را دنبال می‌کند، استفاده می‌شود. در نتیجه، توانی که از اینورتر خارج می‌شود دارای ضریب توانی واحد است. امکان دارد استراتژی‌های کنترل مختلفی برای کلیدزنی استفاده شود، اما استراتژی ضریب توان واحد ساده تر و رایج تر است. همچنین این روش اجازه انتقال کامل توان اکتیو را می‌دهد. اگر چنانکه اینورتر قابلیت جزیره‌ای شدن را داشته باشد، جریان خروجی اینورتر می‌تواند جریان بار (شاید غیرسینوسی) را دنبال کند.

شکل 4 اینورتر مورد استفاده در سیستم کلی را نشان می‌دهد، اینورتر به کار رفته دارای چهار پایه است. IGBT‌های اول - چهارم، سوم - ششم، پنجم - دوم و هفتم - هشتم به ترتیب برای فازهای a, b, c و سیم نول به کار برده شده‌اند. به دلیل آنکه اینورتر به نقطه PCC در سیستم توزیع چهار سیمه متصل است لذا پایه چهارم جهت عبور جریان سیم نول به لینک DC، تعبیه شده است. نحوه‌ی کنترل و تولید سیگنال‌های مطلوب برای کلیدزنی در IGBT 8 مورد استفاده، به طور کامل در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد.

³ Switching

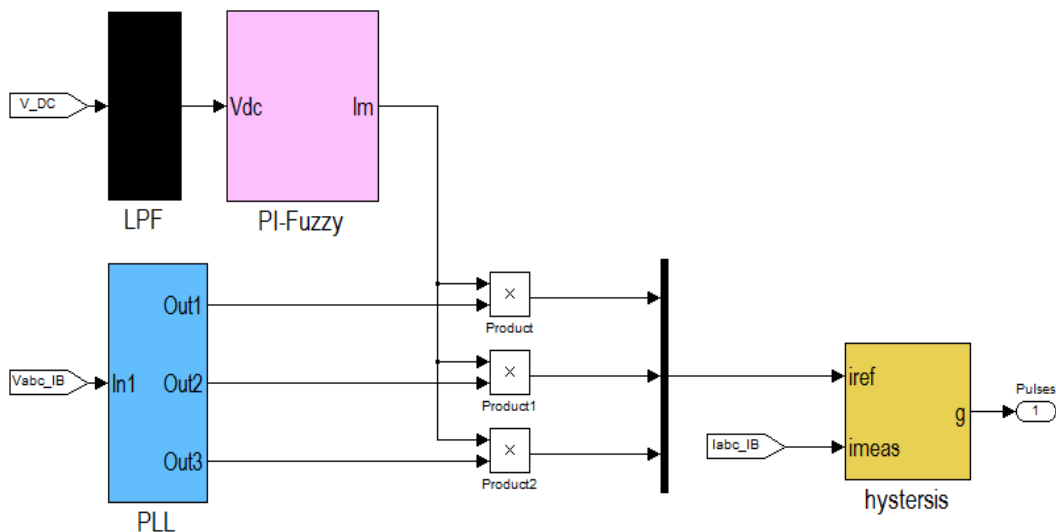
⁴ Insulated Gate Bipolar Transistor



شکل 4 اینورتر 4 پایه مورد استفاده در سیستم کلی

5- استراتژی کنترل کننده پالس های کلیدزنی

در طرح سیستم پیشنهادی همان گونه که در شکل 1 مشاهده شد، نقطه‌ی PCC نقش یک گره را ایفا می‌کند و قانون جریان کیرشهف⁵ برای جریان های شبکه توزیع، بار و اینورتر صادق است. کنترل کننده‌ی اینورتر در راستای جبران جریان بار در نقطه‌ی PCC عمل کرده و کلیدزنی صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه شکل موج جریان بارهای غیرخطی و نامتعادل بصورت سینوسی کامل نیست، لذا تاثیر این بارها بر روی جریان طرف شبکه باعث می‌شود که هارمونیک‌های مولفه‌ی پایین تر در شکل موج جریان طرف شبکه نیز ظاهر شوند. در نتیجه اینورتر جبرانی غیر سینوسی به نقطه‌ی PCC تزریق می‌کند تا با جریان بار جمع شده و در نهایت جبرانی سینوسی در طرف شبکه‌ی سیستم توزیع داشته باشیم. ساختار کلی کنترل کننده‌ی اینورتر در شکل 5 نشان داده شده است. کنترل کننده از چند بخش مختلف تشکیل شده است، که در ادامه بخش‌های PLL، PI-Fuzzy و کنترل Hysteresis بصورت مجزا تشریح خواهند شد.



شکل 5 ساختار بلوکی کنترل کننده‌ی اینورتر

⁵ Kirchoff's Current Low

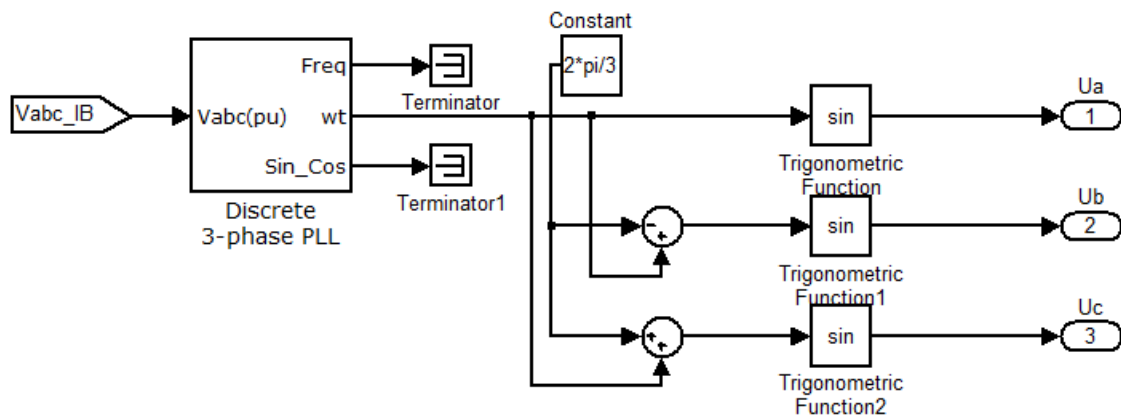
کنترل کننده در راستای تولید سیگنال های مرجع جریان برای مقایسه با جریان های شبکه ی قدرت در کنترل کننده ی هیستریزیس، کار می کند. لذا جهت دستیابی به ضریب توان واحد لازم است که سیگنال های جریان مرجع، شکل موج ولتاژ شبکه ی قدرت را دنبال کنند. در این راستا، با وارد کردن ولتاژ شبکه ی قدرت به یک حلقه ی قفل شده ی فاز، زاویه ولتاژ شبکه ی قدرت (θ) استخراج شده و طبق معادلات (1)، (2) و (3) این زاویه برای تولید ولتاژ های سه فاز واحد استفاده شده است.

$$U_a = \sin(\theta) \quad (1)$$

$$U_b = \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$U_c = \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

سیگنال های ولتاژ تولید شده نسبت به هم دارای اختلاف فاز 120 درجه و مطابق شکل 3-6 می باشد [10].



شکل 6 تولید سیگنال های ولتاژ واحد توسط PLL

قسمت عمده ی کنترل کننده ی شکل 5 را نحوه ی تولید سیگنال مرجع (I_m) تشکیل می دهد. بعد از اندازه گیری ولتاژ لینک DC، سیگنال ولتاژ از یک فیلتر پایین گذر⁶ جهت حذف نوسانات ناشی از کلیدزنی عبور داده خواهد شد. سیگنال ولتاژی که از فیلتر عبور می کند (V_{DC})، جهت تثبیت ولتاژ در لینک DC با یک ولتاژ مرجع (V_{DC}^*) مقایسه خواهد شد. اختلاف ولتاژ لینک DC و ولتاژ مرجع طبق رابطه (4) تحت عنوان ولتاژ خطا (V_{DCerr}) به یک کنترل کننده ی منطق فازی⁷ جهت تولید بهره های تناسبی و انتگرالی کنترل کننده PI گسسته اعمال می شود.

$$V_{DCerr(n)} = V_{DC}^* - V_{DC(n)} \quad (4)$$

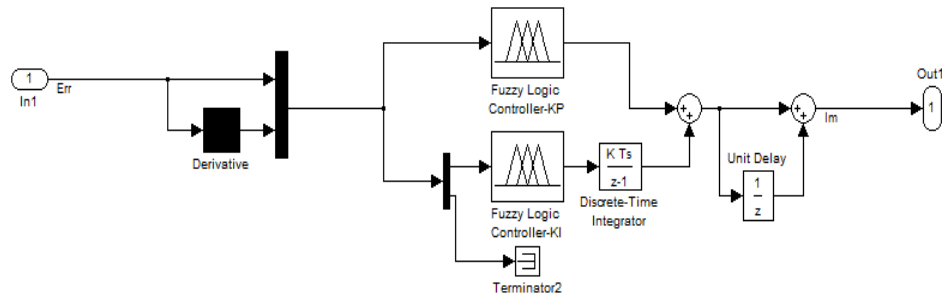
خروجی کنترل کننده ی PI گسسته در n امین لحظه مطابق معادله (5) سیگنال جریان مرجع (I_m) را تولید می کند [10]. برای استخراج مقادیر بهینه ی بهره های کنترل کننده ی PI توسط کنترل کننده ی نرم منطق فازی، از کنترل ترکیبی⁸ استفاده شده است. ساختار کنترل کننده ی مذکور در شکل 7 نشان داده شده است. در ادامه ضمن ارائه توضیحاتی در خصوص کنترل ترکیبی، به مقدمه ای از مبحث منطق فازی و نحوه عملکرد کنترل کننده ی فازی پرداخته شده است.

$$I_{m(n)} = I_{m(n-1)} + K_{PV_{DC(n)}}(V_{DCerr(n)} - V_{DCerr(n-1)}) + K_{IV_{DC(n)}}V_{DCerr(n)} \quad (5)$$

⁶ Low Pass Filter

⁷ Fuzzy Logic Controller

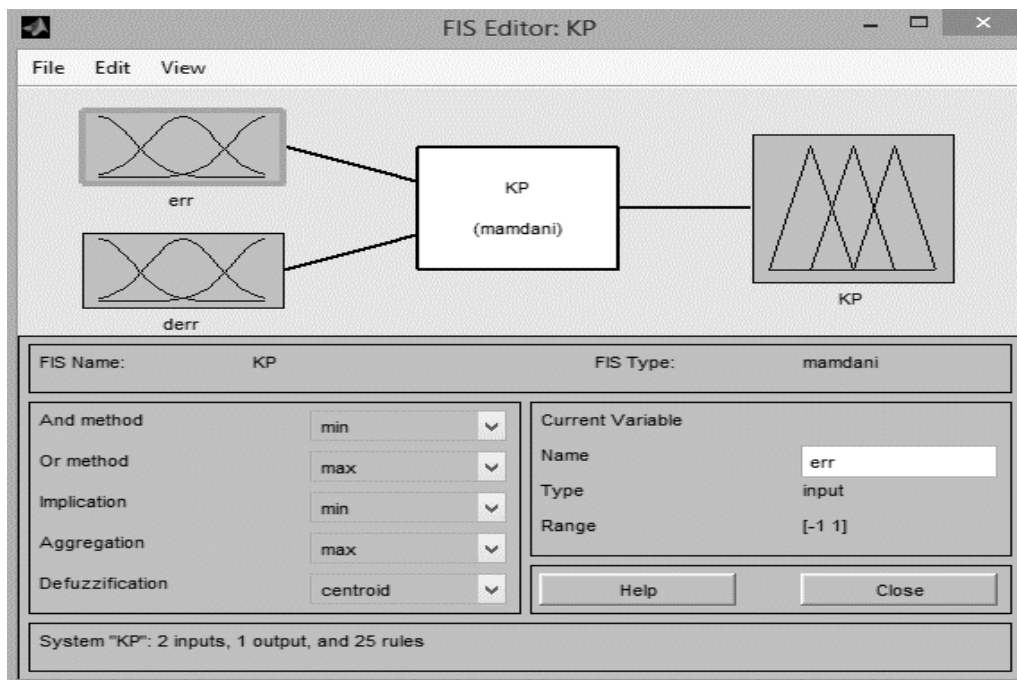
⁸ Hybrid Control



شکل 7 کنترل کننده‌ی PI-Fuzzy

همیشه عواملی در محیط وجود دارند که اختیار آن از دست ما خارج است لذا نمی‌توان در تمامی مباحث روزانه با اطمینان کامل در مورد مسائل صحبت کرد. این مسئله به دلیل تفاوت درک ما از محیط و حقیقت واقعی اشیاء می‌باشد. فازی حوزه‌ای است که این دو مقوله را با توضیحات، روابط و توابع ریاضی به هم ربط می‌دهد. فازی در لغت به معنای نامفهوم و نامشخص است ولی به خاطر تاکید بر جنبه‌ی علمی و جداسازی مبحث از حوزه کلامی این لغت بدون ترجمه به کار برده می‌شود. همانطور که اشاره شد فازی روابط بین دقت و حقیقت یا معنا را با توابع ریاضی بیان می‌کند. با این حال، با فاصله گرفتن از ریاضیات فازی، تا حدودی به سرعت کار افزوده خواهد شد و به جنبه کاربردی فازی نزدیک‌تر می‌شویم [7].

استنتاج فازی، فرایند فرموله کردن نگاشت ورودی داده شده به یک خروجی با استفاده از منطق فازی است. پس از آن، نگاشت یک مبنا در مورد این که تصمیم ما چه می‌تواند باشد یا اینکه الگوی تصمیم‌گیری چه باشد را برای ما مهیا می‌کند. فرایند استنتاج فازی شامل قسمت‌هایی مانند: توابع عضویت⁹، عملگرهای منطق فازی و قوانین اگر-آنگاه است [8]. مطابق شکل 8 کنترل کننده‌ی منطق فازی برای سیستم کلی از دو ورودی V_{DCerr} و مشتق این مقدار (و یک خروجی سیگنال مرجع I_m) تشکیل شده است. هر ورودی و خروجی دارای تابع عضویت منحصر به فردی است که بسته به تغییرات آن طراحی می‌شود.

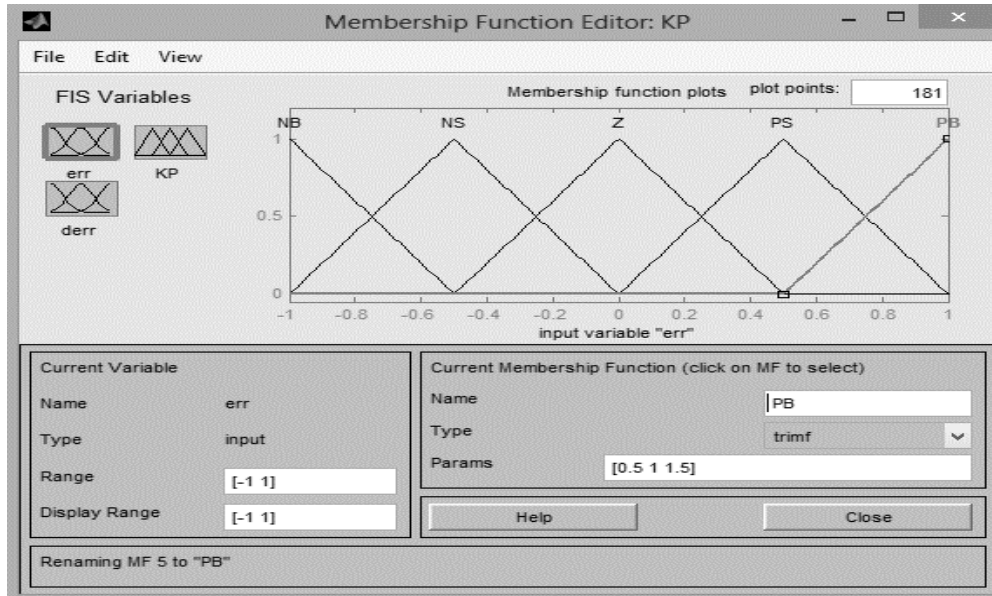


شکل 8 ویرایشگر سیستم‌های استنتاج فازی برای بهره‌ی تناسبی

⁹ Member function

در نتیجه برای تولید سیگنال خروجی I_m لازم است که نسبت بازه‌ی تابع عضویت برای ورودی و خروجی بهره‌های کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرالی به دقت انتخاب شود.

در شکل 9 ویرایشگر تابع عضویت نشان داده شده است. توسط این ویرایشگر می‌توان نوع تابع عضویت، تعداد توابع مورد استفاده و همچنین بازه‌ی تغییرات توابع را تعیین کرد.



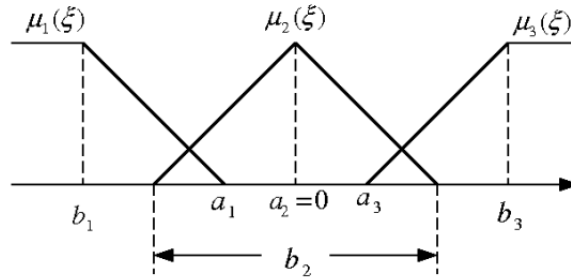
شکل 9 ویرایشگر تابع عضویت

همانطور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، از پنج تابع عضویت مثلثی برای هر ورودی و یا خروجی استفاده شده است. هر یک از این پنج تابع با تابع مجاور خود دارای بازه‌ی مشترکی هستند. نام‌گذاری این توابع با توجه به بازه‌ای که در آن قرار گرفته‌اند، انجام می‌گیرد. برای بازه‌های منفی بزرگ، منفی کوچک، صفر، مثبت کوچک و مثبت بزرگ به ترتیب NB، Z، NS، PS و PB در نظر گرفته شده است [9]. البته جهت پوشش دادن محدوده‌ی خارج از کنترل‌کننده‌ی فازی، باید دو تابع NB و PB را توابع دوزنقه‌ای در نظر گرفت. جهت خلاصه‌کاری می‌توان برای یک ورودی متشکل از سه تابع عضویت همانطور که در شکل 10 نشان داده شده است، روابط زیر را اعمال کرد.

$$NB = \begin{cases} 1 & V_{dcerr} \leq b_1 \\ \frac{V_{dcerr} - a_1}{b_1 - a_1} & b_1 < V_{dcerr} < a_1 \\ 0 & V_{dcerr} \geq a_1 \end{cases} \quad (5)$$

$$Z = \begin{cases} 1 - \frac{V_{dcerr} - a_2}{0.5b_2} & |V_{dcerr} - a_2| \leq 0.5b_2 \\ 0 & |V_{dcerr} - a_2| \geq 0.5b_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$PB = \begin{cases} 0 & V_{dcerr} \leq a_3 \\ \frac{V_{dcerr} - a_3}{b_3 - a_3} & a_3 < V_{dcerr} < b_3 \\ 1 & V_{dcerr} \geq b_3 \end{cases} \quad (7)$$



شکل 10 تابع عضویت فازی

در جداول 1 و 2 نحوه تعیین قوانین فازی برای خروجی، با توجه به تغییرات ورودی‌ها نشان داده شده است.

جدول 1: رابطه ورودی و خروجی تعیین شده توسط قوانین فازی برای بهره‌ی تناسبی

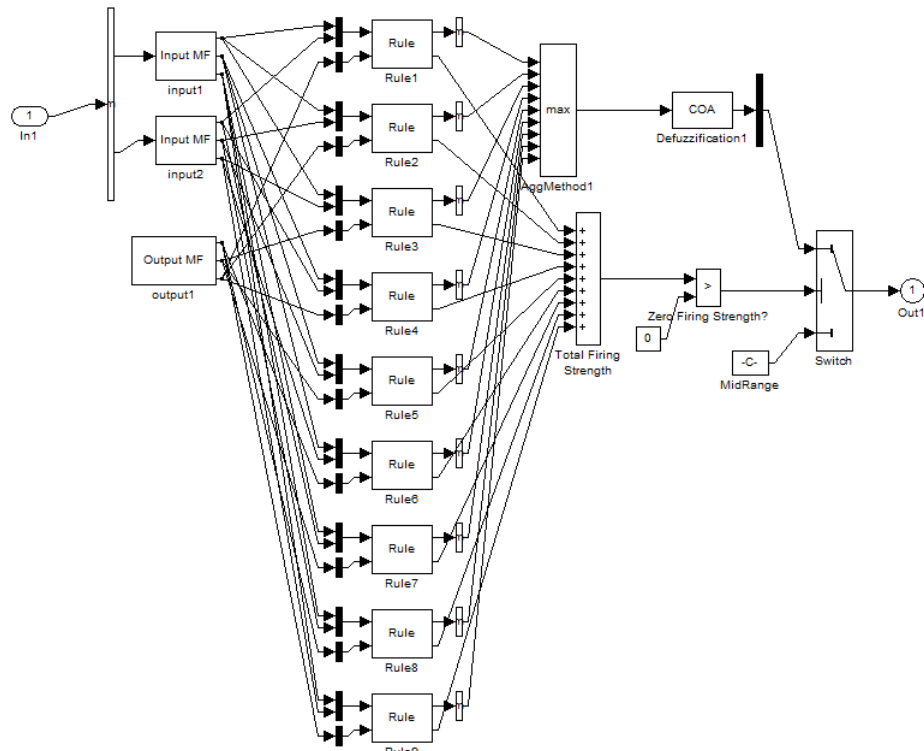
Kp		V_{DCerr}				
		NB	NS	Z	PS	PB
dV_{DCerr}	NB	NB	NB	NB	NS	Z
	NS	NB	NB	NS	Z	PS
	Z	NB	NS	Z	PS	PB
	PS	NS	Z	PS	PB	PB
	PB	Z	PS	PB	PB	PB

جدول 2: رابطه ورودی و خروجی تعیین شده توسط قوانین فازی برای بهره‌ی انتگرالی

Ki	NB	NS	Z	PS	PB
V_{DCerr}	NB	NS	Z	PS	PB

منطق فازی شامل یک سری از قطعه‌ها¹⁰ هستند که به منظور شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Simulink استفاده می‌شوند. این قسمت بطور خاص برای سیستم‌های سریعی که از فازی استفاده می‌کنند، طراحی شده است. در سیستم اصلی، دو بلوک کنترل‌کننده فازی برای بهره‌های تناسبی-انتگرالی به کار رفته که فقط نمای کنترل بهره‌ی تناسبی در شکل 11 نشان داده شده است. در واقع طراحی این دو بلوک به غیر از تعیین بازه‌های توابع عضویت، در نوع تابع و ساختار کلی همانند هم است. البته شکل 11 برای یک سیستم با ورودی‌های 3 تابعه نشان داده شده است (به دلیل کاهش تعداد قوانین). در سیستم اصلی از کنترل‌کننده با توابع 5 تایی استفاده شده است [7].

¹⁰ Devices

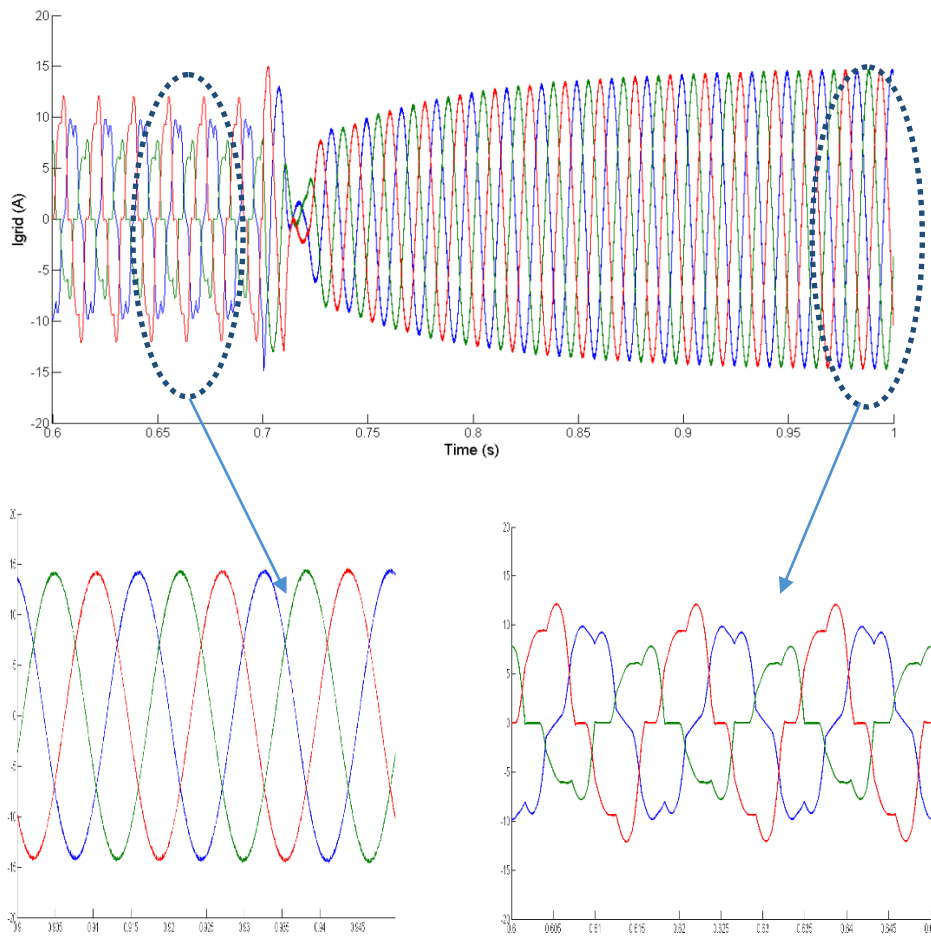


شکل 11 نحوه طراحی FLC بهره تناسبی در محیط Simulink

با توجه به مطالب فوق، پس از استخراج سیگنال مرجع I_m توسط کنترل کننده PI-Fuzzy، با ضرب این مقدار در سیگنال‌های ولتاژ واحد طبق معادلات زیر و همانند فرایند شکل 5، سیگنال‌های جریان مرجع سه فاز بدست می‌آیند.

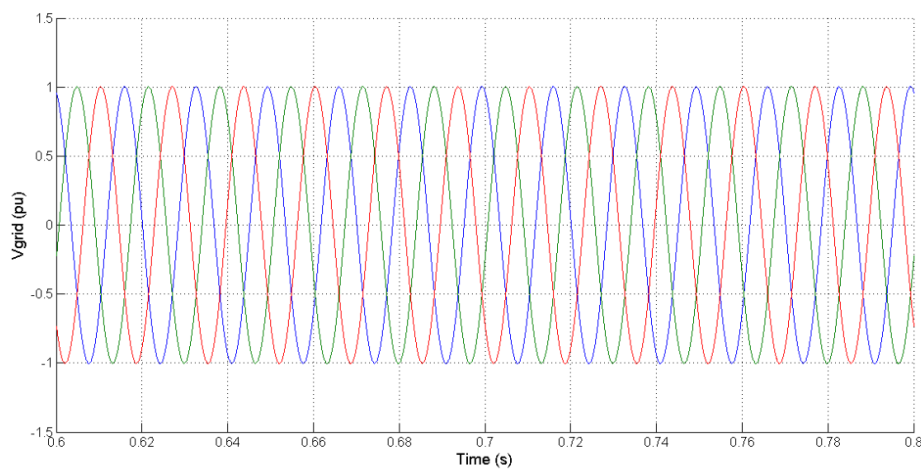
7- تحلیل هارمونیک‌های جریان

همانطور که در فصل قبل اشاره شد، جریان سه فاز شبکه تا قبل از اعمال کنترل کننده اینورتر متحمل جریان بارهای متصل به نقطه‌ی PCC است. در شکل 4-1 مشاهده می‌شود که در ثانیه‌ی 0/7 کنترل کننده اینورتر وارد مدار می‌شود. تغییرات در شکل موج جریان شبکه بعد از عمل جبران‌سازی کاملاً مشهود است.



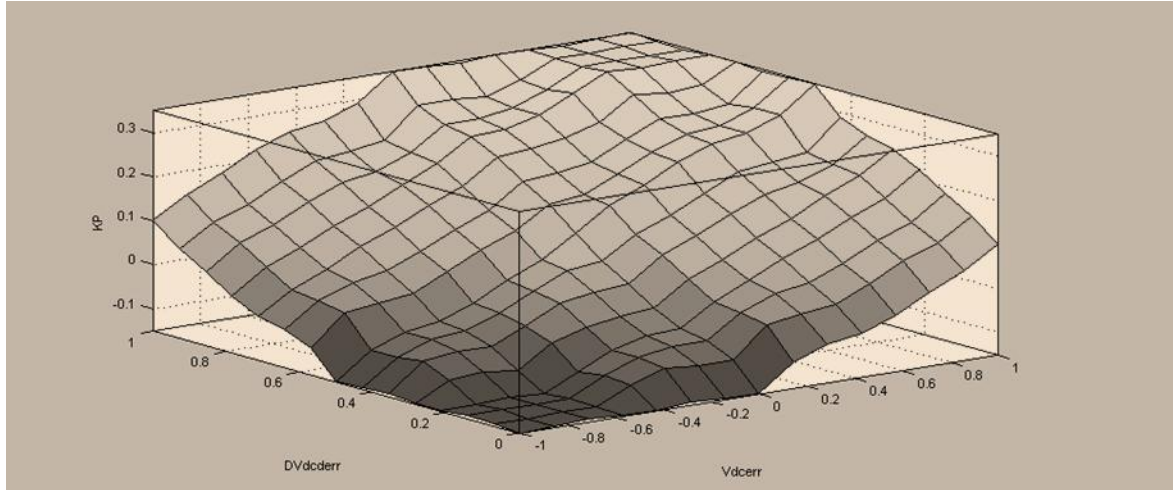
شکل 12 موج جریان شبکه قبل و بعد از اعمال کنترل کننده

چنانکه در شکل 13 نشان داده شده است، ولتاژ شبکه (که به عنوان مرجع سیگنال PLL مورد استفاده قرار می گیرد) در یک پریودیت ثابت باقی می ماند.



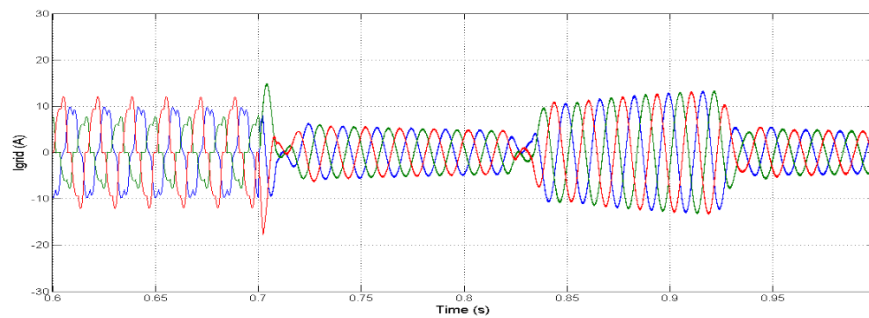
شکل 13 ولتاژ شبکه

با وجود تغییرات در انتقال توان آرایه‌ی فتوولتائیک، لذا سرعت پاسخ‌دهی کنترل‌کننده بسیار مهم است. عملکرد پاسخ‌دهی کنترل فازی که نحوه‌ی تغییرات سطحی بهره‌ی تناسبی آن در شکل 14 نمایش داده شده است، به مراتب از کنترل‌کننده‌ی سخت همانند [26] بهتر است.

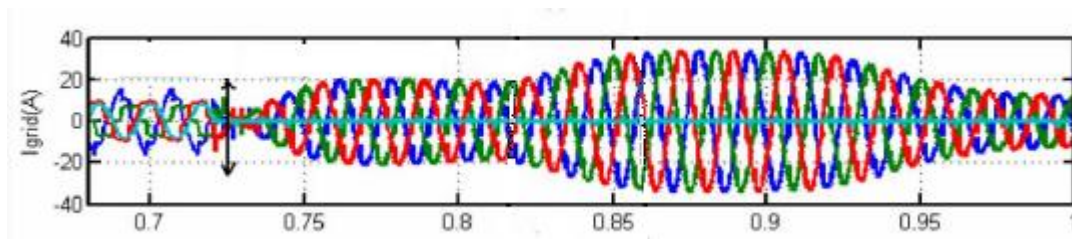


شکل 14 نمایش سطحی بهره‌ی تناسبی کنترل فازی

در شکل‌های 15 و 16 چگونگی تغییرات جریان شبکه ناشی از تغییرات آنی توان تزریقی اینورتر توسط منابع RES نشان داده شده است.



شکل 15 تغییرات جریان شبکه‌ی سیستم بعد از عملکرد کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی



شکل 16 تغییرات جریان شبکه‌ی سیستم بعد از عملکرد کنترل‌کننده‌ی PI

مطابق شکل 15 با تغییرات تابش و در نهایت توان در منابع RES بصورت آنی، جریان شبکه نیز واکنش سریع نشان می‌دهد، اما این مسئله در شکل 16 صادق نیست و تغییرات جریان با وجود کنترل سخت PI با تاخیر می‌باشد.



دومین کنگره بین المللی علوم و مهندسی

آلمان - هامبورگ

اسفند ماه 1397

7- نتیجه گیری

در این مقاله یک استراتژی کنترلی جدید برای کنترل اینورتر متصل به شبکه جهت بهبود کیفیت توان در نقطه‌ی PCC سیستم توزیع سه فاز چهار سیمه ارائه شد. بررسی کامل ساختار سیستم، استراتژی کنترلی و همچنین تشریح منابع انرژی تجدیدپذیر بخصوص آرایه‌های فتوولتائیک انجام گرفت. مطابق نتایج بدست آمده در فصل چهارم گزارش مقاله، نشان داده شد که اینورتر منابع انرژی تجدیدپذیر، می‌تواند علاوه بر انجام کار عادی خود (انتقال توان)، در بهبود کیفیت توان نیز موثر باشد. اینورتر متصل به شبکه با روش کنترلی اعمالی می‌تواند برای دو عمل مهم کارساز باشد:

1) تزریق توان تولیدی از منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه و برعکس.

2) عملکردی همانند فیلتر اکتیو توان موازی داشته باشد.

با استفاده از روش پیشنهادی، دیگر نیازی به استفاده از ادوات اضافی جهت تنظیم توان وجود نخواهد داشت، و اینورتر متصل مابین شبکه و لینک DC می‌تواند همچون یک ابزار چند منظوره به کار گرفته شود. همانطور که از نتایج مشاهده شد، در سناریوهای مختلف زیر بهبود کیفیت توان بدست آمد:

1) آرایه‌ی خورشیدی توانی تولید نکند.

2) آرایه‌ی خورشیدی توانی کمتر از توان بار تولید کند.

3) آرایه‌ی خورشیدی توانی بیشتر از توان بار تولید کند.

در روش مذکور جریان نامتعادلی، هارمونیک‌های جریان شبکه و توان راکتیو بار که به دلیل حضور بارهای غیرخطی و نامتعادل در نقطه‌ی PCC بوجود آمده‌اند، به خوبی جبران شدند، بطوری که جریان شبکه بعد از جبران‌سازی کاملاً بصورت سه فاز متعادل و البته سینوسی حاصل شد. همچنین، جذب جریان نول بار توسط پایه‌ی چهارم اینورتر باعث می‌شود که سیم چهارم شبکه، جریان نول بار را دنبال نکند و به صفر می‌رسد. هنگامی که توان تولیدی توسط آرایه‌ی فتوولتائیک از مقدار توان بار بیشتر می‌شود، اینورتر متصل به شبکه و استراتژی کنترلی مربوطه نه تنها مقدار توان اکتیو و راکتیو بار را تامین می‌کند (البته با جبران هارمونیک) بلکه توان اضافی تولیدی (با ضریب توان یک و کاملاً سینوسی) را به شبکه تزریق خواهد کرد. در نهایت سرعت پاسخ‌دهی بالا و عملکرد دینامیکی مناسب کنترل‌کننده به دلیل استفاده‌ی همزمان کنترل نرم و سخت، در مقایسه با دیگر کنترل‌کننده‌های به کار رفته، از ویژگی‌های روش پیشنهادی در مقاله می‌باشد.



دومین کنگره بین المللی علوم و مهندسی

آلمان - هامبورگ

اسفند ماه 1397

مراجع

- [1] Bollen, Math HJ. "Characterisation of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 12.4 (1997): 1666-1671.
- [2] Schoene, Jens. "Evaluation of the Impact on Non-Linear Power on Wiring Requirements for Commercial Buildings." (2011).
- [3] E. W. Gunther, J. Rossman, "Application of Advanced Characterization Algorithms, UCA and Internet Communications Technology at the Point of Power Quantity and Quality Measurement," Conference Proceedings of EPRI PQA 2016.
- [4] Nguyen, Hoa M., and D. Subbaram Naidu. "Advanced control strategies for wind energy systems: An overview." *Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES. IEEE, 2011.*
- [5] Li, Wei. "Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller." *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 6.4 (2015): 449-463.
- [6] Zadeh, Lotfi A. "Fuzzy sets." *Information and control* 8.3 (1965).
- [7] منطق فازی با استفاده از MATLAB، ترجمه: دکتر فریدون شعبانی‌نیا، مهندس سینا سعیدنیا، تهران: خانیران، 1385.
- [8] Siler, William, and James J. Buckley. *Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning*. Wiley. com, 2005.
- [9] Rosyadi, Marwan, et al. "Transient stability enhancement of variable speed permanent magnet wind generator using adaptive PI-Fuzzy controller." *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim. IEEE, 2014.*
- [10] Lowen, Robert. *Fuzzy set theory: basic concepts, techniques and bibliography*. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [11] Passino, Kevin M., and Stephen Yurkovich. *Fuzzy control*. Vol. 42. Menlo Park, CA: Addison-Wesley, 1998.
- [12] Ciezki, John G., and Robert W. Ashton. *PEBB Feedback Control Low Library. Volume 1: Three-Phase Inverter Control Algorithms*. No. NPS-EC-99-002. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA DEPT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 1999.
- [13] Rashid, Muhammad Harunur. *Power electronics: circuits, devices, and applications*. Pearson Education India, 2013.
- [14] Ilavarasi, V., and C. Christofer Asir Rajan. "Power quality improvement in grid connected system using four leg VSI." *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on. IEEE, 2012.*
- [15] منابع تولید انرژی الکتریکی در قرن بیست و یکم، تالیف: دکتر سید مسعود مقدس تفرشی، تهران: دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، 1384.
- [16] Kramer, W., et al. "Advanced power electronic interfaces for distributed energy systems." *Nat. Renew. Energy Lab., Cambridge, MA, Rep. NREL/Tp-581-42672* 1 (2008).
- [17] Twidell, John, and Tony Weir. *Renewable energy resources*. Taylor & Francis, 2013.
- [18] ESRAM, Trishan, and Patrick L. Chapman. "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques." *Energy conversion, IEEE transactions on* 22.2 (2007): 439-449.
- [19] De Soto, Widaly, S. A. Klein, and W. A. Beckman. "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance." *Solar energy* 80.1 (2006): 78-88.



دومین کنگره بین المللی علوم و مهندسی

آلمان – هامبورگ

اسفند ماه 1397

- [20] Patel, Mukund R. *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*. CRC press, 2005.
- [21] Salas, V., et al. "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 90.11 (2016): 1555-1578.
- [22] De la Rosa, Francisco. *Harmonics and power systems*. CRC Prese, 2006.
- [23] Zhang, R., et al. "Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage source converters , " *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002. 17(3): p. 314-326.
- [24] Zhang, Wenping, et al. "Study on neutral-point voltage balance of 3-level NPC inverter in 3-phase 4-wire system." *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2015 2nd IEEE International Symposium on. IEEE, 2015.
- [25] Ferreira, Filipe, et al. "A control strategy for a three-phase four-wire shunt active filter." *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*. IEEE, 2008.
- [26] Singh, Mukhtiar, et al. "Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 26.1 (2011): 307-315.