

بکارگیری تکنیک سوئیچینگ نرم جدید در فیلترهای توان اکتیو (APF) سه فاز

کیوان بهزادپور^۱، محمدرضا امینی^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان، keivan_bp@yahoo.com

^۲عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان، mr.amini@khuif.ac.ir

چکیده - با گسترش و توسعه بارهای غیر خطی نیاز به ولتاژ و جریان پایدار یک ضرورت است. در شبکه های فشار ضعیف و فشار متوسط وجود بارهای غیر خطی تولید هارمونیک می کند و کاهش جریان بار را نیز همراه دارند. فیلترهای توان اکتیو (APF) در کاهش اثرات مخرب این هارمونیک ها و همچنین جبران جریان نقش مهمی ایفا می کنند کاربرد آن ها بیشتر در حوزه ولتاژ کم و متوسط می باشد و وظیفه جبران جریان هارمونیک را به عهده دارند. اساس عملکرد APF ها بر مبنای مبدل های سوئیچینگ است. مبدل های قدرت مرسوم با روش PWM و تحت شرایط سوئیچینگ سخت کار می کنند. در خلال یک فرایند قطع یا وصل سوئیچ باید در مقابل ولتاژ و جریان زیاد به طور همزمان ایستادگی کند که این امر موجب تلفات سوئیچینگ زیاد و استرس ولتاژ می شود. در این مقاله با استفاده از مبدل سوئیچینگ نرم با لینک DC شبه رزونانسی، یک توپولوژی جدید برای APF ارائه گردیده که اهداف آن افزایش راندمان و کاهش تلفات و همچنین کاستن از حجم مدار جهت پایین آوردن هزینه های اقتصادی می باشد.

کلید واژه- فیلتر توان اکتیو (APF)، سوئیچینگ نرم، سوئیچینگ سخت، سوئیچینگ در ولتاژ صفر (ZVS) سوئیچینگ در جریان صفر (ZCS)

شبکه قدرت می باشند. در مباحث مربوط به APF ها قابلیت اطمینان منبع ولتاژ از اهمیت ویژه ای برخوردار است. ویژگی های قابلیت اطمینان منبع شامل موارد زیر می باشد:

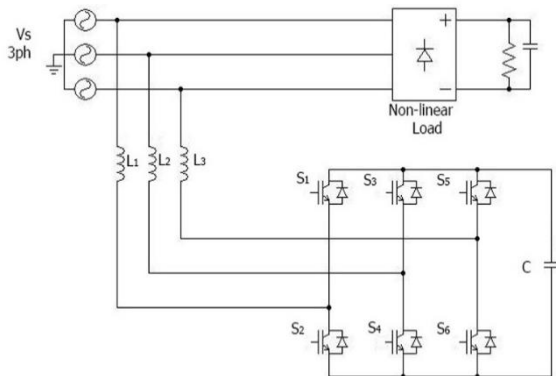
- کافی بودن (توانایی تامین بار)
- امنیت (توانایی تحمل کردن اختلالات ناگهانی مانند خطاهای سیستم)
- دسترسی (توجه ویژه به وقفه های طولانی)

در فیلتر های توان اکتیو مباحث مربوط به کنترل جریان و سوئیچینگ مبدل در بهبود عملکرد و کیفیت آن نقش بسزایی دارد. در شکل (۱) می توانید شماتیکی کلی از شبکه قدرت شامل منبع، بار، خطوط انتقال و فیلتر توان اکتیو و نحوه اتصال آن به شبکه را ببینید [۳] و [۴]. پیشرفت علم الکترونیک قدرت در دهه های اخیر، نه تنها موجب بهبود کارایی تجهیزات الکترونیک قدرت شده است، بلکه به مطرح کردن رویکردهای جدیدی در تغییر ساختار و کنترل مبدل ها منجر شده است. مبدل های قدرت مرسوم با روش PWM و تحت شرایط

۱- مقدمه

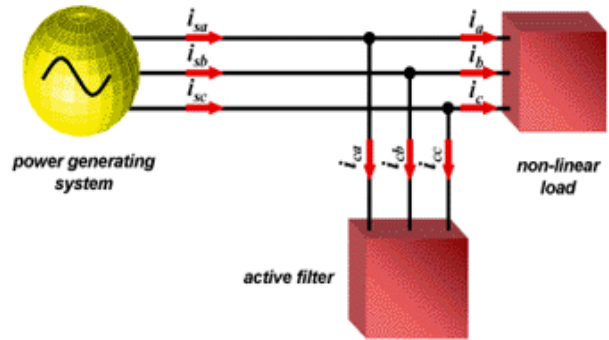
در صنعت برق مسائل مربوط به کیفیت توان از اهمیت ویژه ای برخوردار است. اما به دلیل وجود عوامل ایجاد اختلال و بروز حوادث ناخواسته که عمدتاً اجتناب ناپذیر نیز می باشند در شکل موج ولتاژ، جریان و در نتیجه در کیفیت توان شبکه انحرافات از مقادیر مطلوب رخ می دهد و همچنین قابلیت اطمینان شبکه نیز کاهش می یابد [۱]. جلوگیری و یا کاهش بروز اینگونه اختلالات و اشکالات در شبکه قدرت و اصلاح ضریب توان امری لازم است تا شبکه شاهد کمترین میزان انحراف در ولتاژ، جریان و فرکانس و در نهایت کیفیت توان باشد. در حال حاضر فیلترهای توان اکتیو به طور گسترده ای در مطالعات و تحقیقات کاربردی در زمینه بهبود کیفیت توان مورد استفاده قرار میگیرند. که این امر می تواند به حل مشکلاتی نظیر تنظیم ولتاژ ترمینال سه فاز و کاهش نوسانات ولتاژی و همچنین بهبود بالانس ولتاژ و حذف موثر هارمونیک ها منجر شود [۲]. APF ها ادواتی بسیار مهم در

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



شکل ۲: ساختار مدارای یک APF در یک شبکه قدرت

سوئیچینگ سخت کار می کنند.



شکل ۱: شماتیک کلی APF و اتصال آن به شبکه

اسنابر لینک DC رزونانس کمکی (ARDCL) از جمله مدارهای کاربردی در APF می باشد. توپولوژی مداری شامل دو خازن شبه رزونانس است: C_{r1} به عنوان خازن اسنابر بدون اتلاف و C_{r2} به عنوان یک خازن ذخیره انرژی، سلف شبه رزونانس L_r سه دستگاه توان سوئیچ فعال، S_{a1} به عنوان ولتاژ ثابت ذخیره شده در خازن رزونانس C_{r1} و S_{a3} برای شارژ و تخلیه و حفظ انرژی ذخیره شده در C_{r2} . علاوه بر این، اینورتر موازی، سوئیچ فعال دستگاه سوئیچینگ را تجهیز می کند، S_{a2} برای شارژ و تخلیه انرژی D_{INV} است که مرتبط با هر سوئیچ فعال اصلی می باشد در هر بازوی پل سه فاز یکی شده است. منبع DC جریان بار I_O به جریان فیلتر AC مبدل منبع ولتاژ مرتبط است. این جریان I_O می تواند ثابت نگه داشته شود.

مدار فیلتر توان اکتیو سه فاز ولتاژ دوبرابر کننده ولتاژ سوئیچینگ نرم (VDSSAPF) شامل چهار کلید اصلی و چهار کلید کمکی می باشد. فضای سوئیچ های اصلی که در VDSSAPF مطرح شده کار می کنند، در سوئیچینگ ولتاژ صفر (ZVS) روشن می شوند، در حالیکه سوئیچ های کمکی که در سوئیچینگ جریان صفر (ZCS) کار می کنند، خاموش می شوند. کاهش در تعداد کلیدها همچنین می تواند ضریب اطمینان را افزایش دهد. [۵-۹]

۲- تکنیک سوئیچینگ نرم پیشنهادی در فیلترهای توان اکتیو سه فاز

مبدل پیشنهادی جهت استفاده در APF، مبدل سه فاز شبه رزونانسی با لینک dc با روش سوئیچینگ نرم (QRDCL) است. مبدل های QRDCL مبدل هایی از نوع سوئیچینگ نرم می باشند که توسط روش مدولاسیون پهنای پالس (PWM) قابل

در خلال یک فرایند قطع یا وصل، سوئیچ می بایست در مقابل ولتاژ و جریان زیاد به طور همزمان ایستادگی کند. که این امر موجب تلفات سوئیچینگ زیاد و استرس می شود. تأثیرات گذرای قابل توجه نظیر تداخل الکترومغناطیسی (EMI) ناشی از نوسانات گذرا که dV/dt و di/dt به وجود می آید و عامل اندوکتانس ها و ظرفیت های خازنی پارازیتی در مدارهای قدرت و سوئیچ ها می باشد. از طرف دیگر تلفات سوئیچینگ با فرکانس رابطه ی مستقیم دارد و بنابراین برای افزایش فرکانس مبدل ها با محدودیت روبه رو هستیم.

برای اطمینان از تحقق بازده تبدیل توان، به اجبار فرکانس سوئیچینگ محدود می شود. در سوئیچینگ نرم هم زمان با کاهش تلفات، امکان افزایش فرکانس کار مدار و کوچک تر شدن اجزای مدار فراهم می گردد. این روش در الکترونیک صنعتی، بسیار کارا است. توپولوژی ارائه شده در اینجا بر مبنای روش سوئیچینگ نرم می باشد و در آن از یک سوئیچ کمکی و یک سوئیچ برای لینک dc استفاده شده است. کلیه عملیات سوئیچینگ در مبدل تحت شرایط ولتاژ صفر (ZVS) انجام می شود و کلیه سوئیچ ها و دیود ها به صورت نرم سوئیچینگ می شوند. استفاده از این مبدل در ترکیب یک فیلتر توان اکتیو منجر به بهبود عملکرد فیلتر و بهبود ضریب توان شبکه خواهد شد.

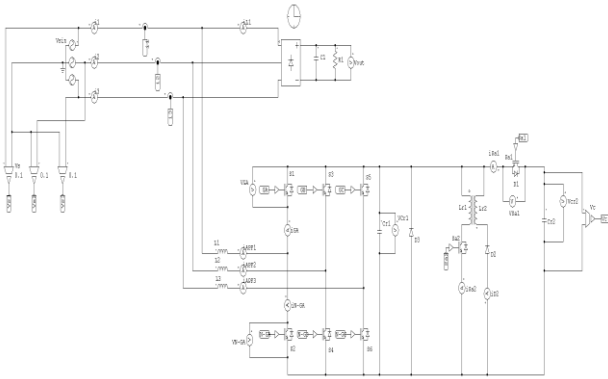
۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

رود. بنابراین جریان سلف L_{r2} افزایش یافته و خازن C_r شروع به شارژ شدن می‌کند. از آنجایی که ولتاژ خازن C_r در ابتدای این وضعیت عملکرد تقریباً صفر است، سوئیچ S_{a2} تحت شرایط ZVS خاموش می‌شود. هنگامی که حالت سوئیچ‌های مبدل در وضعیت قبل تغییر می‌کند.

پس از آن دیود D_1 تحت شرایط ZVS روشن می‌شود. بنابراین سوئیچ S_{a1} می‌تواند تحت شرایط ولتاژ صفر-جریان صفر (ZVZCS) روشن شود. در ادامه D_1 صفر شده و تحت شرایط ZVZCS خاموش می‌شود. بنابراین جریان S_{a1} شروع به افزایش می‌کند و این حالت تا زمان نیاز مجدد به تغییر در وضعیت سوئیچ‌ها ادامه می‌یابد.

۱-۲- تشریح روش کنترلی

در شکل (۴) مدار شبیه‌سازی شده توپولوژی پیشنهادی در نرم افزار PSIM نشان داده شده است.

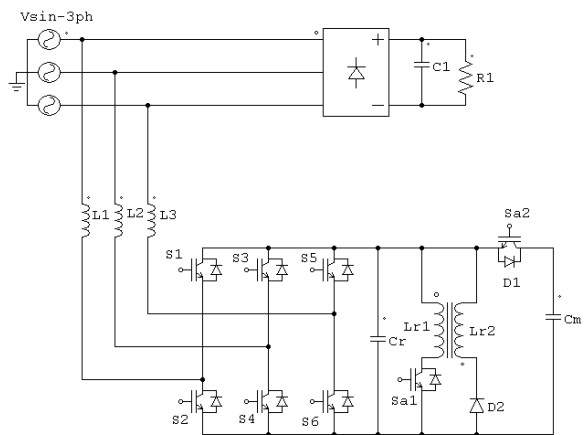


شکل ۴: توپولوژی کلی APF پیشنهادی به همراه مدار کمکی جهت سوئیچینگ نرم

در روش پیشنهادی با استفاده از یک سنسور جریان برای هر فاز و قرار دادن آن در ابتدای خط از سمت منبع به جهت نمونه گیری از جریان ورودی i_1 و i_2 و i_3 و دریافت اطلاعات حاصل و ارسال آن به یک سیستم کنترلی قادر خواهیم بود تا هم جبران جریان را انجام دهیم و هم سیستمی پایدار داشته باشیم. به طور مثال در فاز a جریان منبع برابر است با مجموع جریان بار و جریان جبرانی توسط APF به صورت زیر:

کنترل هستند. کلیه عملیات‌های سوئیچینگ المان‌ها به صورت نرم می‌باشد. در ادامه این بخش به ارائه مبدل پیشنهادی سوئیچینگ نرم QRDCCL جهت بکارگیری آن در APF خواهیم پرداخت و سپس بررسی و تحلیل وضعیت‌های کاری آن را انجام می‌دهیم. در ادامه روند کار به ارائه روش کنترلی پیشنهادی در کنترل APF به همراه شکل موج‌ها و بررسی نتایج آن می‌پردازیم.

شکل (۳) پیکر بندی مبدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. سوئیچ‌های اصلی مبدل از S_1 تا S_6 نام گذاری شده‌اند. سوئیچ لینک dc با S_a و خازن تشدید لینک dc با C_r مشخص شده است. مدار کمکی شامل سوئیچ S_{a2} ، دیود D_2 و سلف‌های کوپل شده L_{r1} و L_{r2} می‌باشد. دیود D_1 نیز به صورت موازی و در جهت عکس سوئیچ S_a قرار گرفته است.

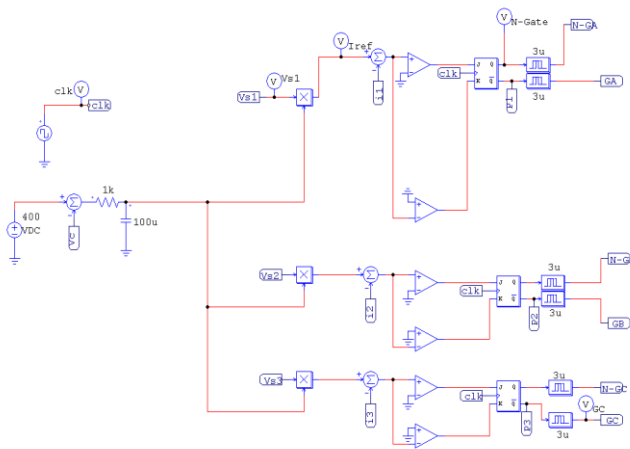


شکل ۳: توپولوژی APF با مبدل سوئیچینگ نرم پیشنهادی QRDCCL

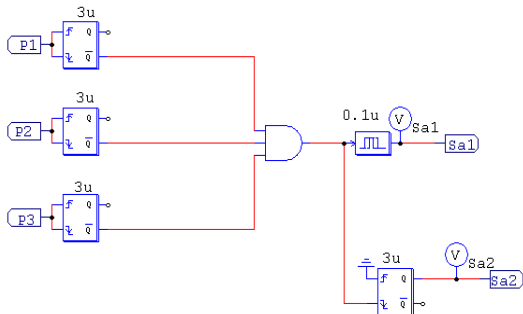
هنگامی که تغییر وضعیت در سوئیچ‌های اصلی مبدل نیاز باشد، S_{a2} روشن می‌شود. به دلیل وجود L_{r1} ، این روشن شدن تحت شرایط ZCS انجام می‌شود و مقدار L_{r1} به صورت خطی افزایش می‌یابد تا به مقدار I_{min} برسد. وقتی که L_{r2} به مقدار I_{min} رسید، سوئیچ S_{a1} باید خاموش شود. S_{a1} به دلیل وجود خازن C_r تحت شرایط ZVS خاموش می‌شود. در این وضعیت بین سلف L_{r1} و خازن C_r تشدید رخ می‌دهد و ولتاژ لینک dc کاهش می‌یابد. در ادامه C_r صفر شده و دیود D_2 روشن می‌شود.

بنابراین، بخشی از شار نشتی L_{r1} به سمت L_{r2} حرکت می‌کند. سپس سوئیچ S_{a2} خاموش می‌شود و جریان سلف L_{r1} به L_{r2} می‌

فلاپ JK داده می شود تا به طور دقیق تری محدوده جریان را ثابت نگه دارد. سپس با تاخیر مناسب پالس متناسب کنترلی گیت های سوئیچ های اصلی مبدل ساخته می شوند. به جهت کنترل فرایند سوئیچینگ S_{a1} و S_{a2} ، پیش از ایجاد تاخیر در پالس گیت سوئیچ های مبدل به طور نمونه از هر شاخه از یک سوئیچ نمونه برداری انجام می شود. سپس این نمونه ها با ترکیب شدن در مونو استابل و سپس یک بلوک AND، پالس مناسب گیت سوئیچ های کمکی S_{a1} و S_{a2} را می سازند. شکل (۶)



شکل ۵: سیستم کنترلی پیشنهادی APF



شکل ۶: مدار ساختن پالس گیت های سوئیچ های S_{a1} و S_{a2}

۳- شبیه سازی و نتایج

شکل (۷) شکل موج ولتاژ و جریان سوئیچ کمکی S_{a1} را نشان می دهد. مقدار ماکسیمم ولتاژ تقریباً در حدود ۴۰۰ ولت می باشد و کل عملیات سوئیچینگ در شرایط ZVS و ZCS می باشند. مدت زمان شبیه سازی ۰/۸ ثانیه است. شرایط شبیه سازی تقریباً ایده آل می باشد.

ولتاژ خازن C_m در حدود ۴۰۰ ولت نوسان می کند. خازن C_r کمک کننده خاموشی سوئیچ S_{a1} و L_{r1} سلف کمک کننده جهت

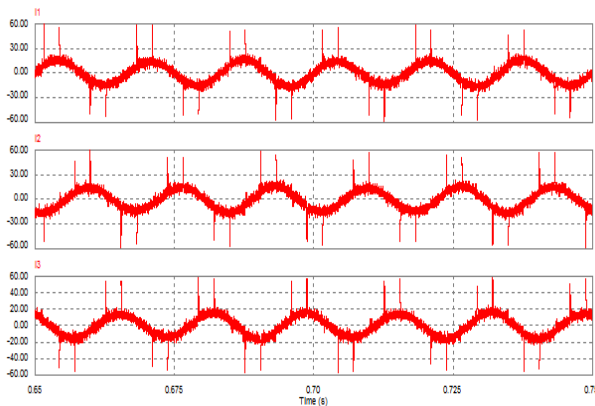
جریان نمونه گیری شده توسط سنسور جریان، i_1 می باشد. برای ساخت جریان مرجع با استفاده از چهار سنسور ولتاژ از ولتاژ خازن قرار گرفته شده در دو سر مبدل APF یعنی C_m و همچنین از سه فاز منبع اصلی ولتاژ نمونه گیری شده و سپس وارد سیستم کنترلی مطابق با شکل ۷ می شوند. جریان مرجع i_{ref} طبق طرح کنترلی در شکل (۵) تولید می شود. کلاک پالس توسط یک منبع تولید موج مربع با فرکانس ۵۰ کیلو هرتز ساخته می شود. جهت تثبیت ولتاژ خازن C_{r2} همانطور که پیش تر نیز بیان شد از آن نمونه گیری می کنیم و با یک منبع ولتاژ DC با مقدار ۴۰۰ ولت وارد یک جمع/تفریق کننده می کنیم. سپس به جهت محدود سازی خروجی آن را به یک فیلتر RC می دهیم. مقادیر استفاده شده در مدار اصلی در جدول (۱) بیان شده است.

جدول (۱): مشخصات عناصر و المان های اصلی مدار

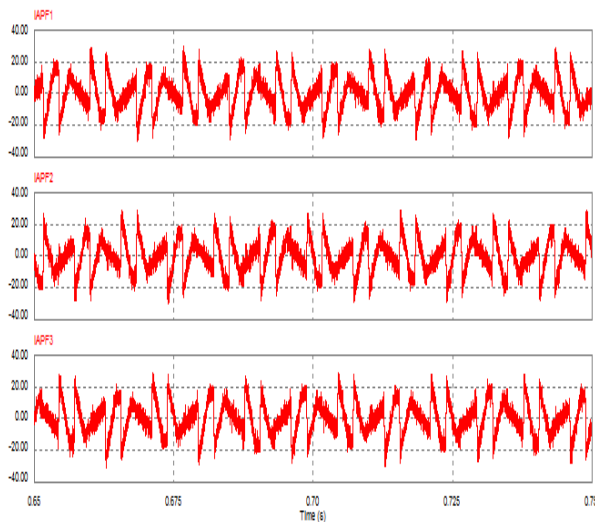
مقدار	نام
۱۰۰ ولت	ولتاژ منبع ورودی
۶۰ هرتز	فرکانس منبع ورودی
۰/۵ میلی هانری	سلف L1
۰/۵ میلی هانری	سلف L2
۰/۵ میلی هانری	سلف L3
۱۰۰۰ میکرو فاراد	خازن C1
۱۰ نانو فاراد	خازن Cr
۱ میلی فاراد	خازن Cm
۱/۷ میکروهانری	سلف Lr1
۲	نسبت دور سیم پیچی (n)

خروجی فیلتر RC وارد یک بلوک ضرب کننده می شود که در یک سوی دیگر آن نمونه ولتاژ هر فاز طبق شکل (۴-۶) می باشد. در نهایت خروجی این بلوک ضرب کننده برای ما جریان مرجع هر فاز را تولید می کند. جریان مرجع با جریان ورودی هر فاز (i_1, i_2, i_3) وارد یک بلوک جمع/تفریق کننده دیگر شده، حاصل وارد دو بلوک مقایسه گر شده و جریان بین دو محدوده مجاز مقایسه می شود. این جریان با یک ضریب خطای بسیار کوچکی ترکیب شده و سطح مقایسه ای بالا و پایین را برای ما ایجاد می کند. در حالتی که اضافه جریان داشته باشیم سیستم کنترلی جریان را کم و در حالت کاهش جریان سیستم جریان را زیاد می کند و در نهایت این سیستم کنترلی جریان را در یک محدوده مجاز نگه می دارد. خروجی بلوک های مقایسه گریه یک فلیپ

مخرب مدار کمکی بر روی THD در فیلتر توان اکتیو پیشنهادی با سوئیچینگ نرم است. راندمان APF با سوئیچینگ نرم پیشنهادی در حدود ۹۵ درصد است و در سیستم مشابه با سوئیچینگ سخت راندمان در حدود ۸۵ درصد می باشد که این امر نیز بیان گر بهبود تقریبی راندمان در سیستم پیشنهادی است. کلیه شبیه سازی ها در نرم افزار PSIM صورت گرفته است و فرکانس منبع تولید موج مربعی مورد استفاده در المان های سوئیچینگ و سیستم کنترلی ۵۰ کیلو هرتز است.



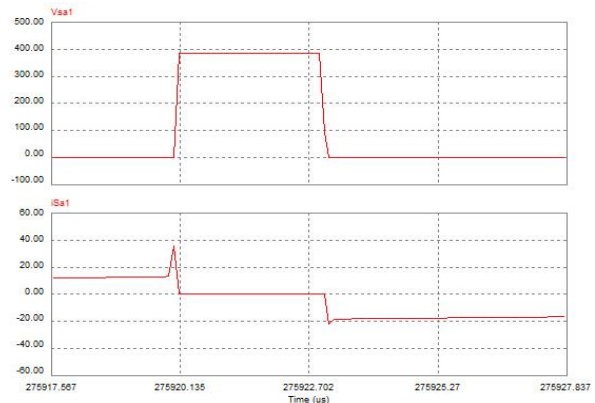
شکل ۹: شکل موج جریان های ورودی i_1 و i_2 و i_3
شکل بالا جریان i_1 ، شکل وسط جریان i_2 ، شکل پایین i_3



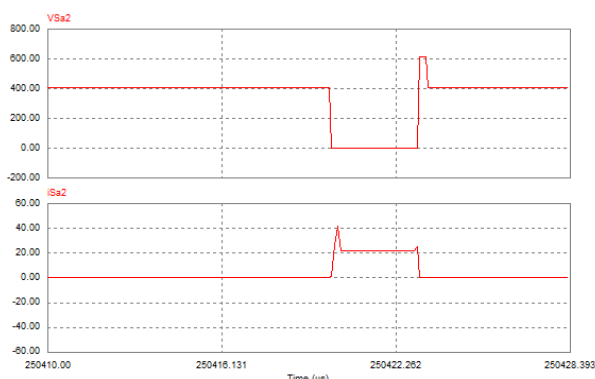
شکل ۱۰: شکل موج های جریان های i_{APF1} و i_{APF2} و i_{APF3}
شکل بالا i_{APF1} ، شکل وسط i_{APF2} ، شکل پایین i_{APF3}

روشن شدن سوئیچ S_{a2} می باشد. مقادیر انتخاب شده همگی در راستای پایدار سازی سیستم با ملاحظات طراحی انتخاب شده اند.

در شکل (۸) شکل موج های ولتاژ و جریان سوئیچ S_{a2} نشان داده شده است. جریان های ورودی i_1 و i_2 و i_3 همانگونه که در شکل (۹) نشان داده شده است نیز در محدوده ۳۰ آمپر و به صورت پایدار در نوسان می باشند. جریان های i_{APF1} و i_{APF2} و i_{APF3} نیز در محدوده ۲۵ آمپر در نوسان هستند. در جدول (۲) در پایان همین بخش به صورت مقایسه ای به بررسی مقادیر راندمان، THD و ضریب توان میان تکنیک سوئیچینگ نرم و سوئیچینگ سخت پرداخته شده است.



شکل ۷: شکل موج های ولتاژ و جریان سوئیچ S_{a1}
شکل بالا ولتاژ سوئیچ، شکل پایین جریان سوئیچ



شکل ۸: شکل موج های ولتاژ و جریان سوئیچ کمکی S_{a2}
شکل بالا ولتاژ سوئیچ، شکل پایین جریان سوئیچ

شکل موج جریان های APF در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ضریب توان (PF) در کل سیستم پیشنهادی در حدود ۰/۹۸ و THD جریان نیز ۰/۱۸ می باشد. در سیستم مشابه با سوئیچینگ سخت ضریب توان در حدود ۰/۹۸ ولی THD جریان در حدود ۰/۱۸ است که این امر نشان دهنده ی عدم تاثیر

[2] M. Rahmani, A. Arora, R. Pfister, P. Huencho, "State of the Art Power Quality Devices and Innovative Concepts", in *VII Seminario de Electrónica de Potencia*, Valparaíso, Chile, Abril 1999.

[3] J. K. Phipps, J.P. Nelson, P. K. Sen, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", in *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 30, No 2, March/April 1994, pp. 176-184.

[4] Y.H. Yan, C.S. Chen, C.S. Moo, and C.T. Hsu, "Harmonic Analysis for Industrial Customers", in *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 30, No 2, March/April 1994, pp. 462-468.

[5] G. Joos, L. Morán, "Principles of Active Power Filters", *Tutorial Course Note. of IEEE Ind. Appl. Society Annual Meeting*, Oct. 1998.

[6] W. M. Grady, M.J. Samotyj, A. H. Noyola, "Survey of Active Power Line Conditioning Methodologies", in *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 5, no 3, pp. 1536-1542, July 1990.

[7] H. Akagi, "New Trends in Active Filters for Power Conditioning," in *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1312-1322, Nov./Dec. 1996.

[8] CJ Maoh, JS Bing, YL Kao, Analysis and Implementation of a Three-Phase Voltage-Doubler Soft-Switching Active Power Filter, 978-1-4673-1792-4/13/\$31.00 ©2013 IEEE

[9] M. R. Amini and H. Farzanehfard, "Novel quasi-parallel resonant DCLink inverter with one auxiliary switch," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power Energy*, Dec. 2008, pp. 614-618.

جدول (۲): مقایسه سوئیچینگ سخت و نرم در APF

عنوان	راندمان	THD	PF
سوئیچینگ سخت	۸۵ درصد	۰/۱۸	۰/۹۸
سوئیچینگ نرم	۹۵ درصد	۰/۱۸	۰/۹۸

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم فیلتر توان اکتیو با استفاده از تکنیک سوئیچینگ نرم ارائه شده است. در مبدل این APF کلیه عملیات سوئیچینگ چه در سوئیچ های اصلی مبدل و چه در سوئیچ های کمکی در شرایط ZVS روشن و خاموش می شوند. سیستم کنترلی ارائه شده در این بخش با استفاده از یک سنسور جریان برای هر فاز و قرار دادن آن در ابتدای خط از سمت منبع به جهت نمونه گیری از جریان ورودی i_1 و i_2 و i_3 عملیات کنترلی APF را انجام می دهد. در واقع این سیستم با استفاده از حداقل المان های مداری قادر خواهد بود تا عملکردی بهینه در کنترل سیستم را دارا باشد. استفاده از مبدل QRDCL پیشنهادی و تلفیق آن با سیستم APF به گونه ای موثر در کاهش تلفات و بهبود یافتن ضریب توان و THD جریان نقش دارد. ضریب توان در APF با سوئیچینگ نرم ۰/۹۸ می باشد که تقریباً با مقدار آن در سوئیچینگ سخت مشابه است. راندمان APF با سوئیچینگ نرم پیشنهادی ۹۵ درصد است که حدوداً ۱۰ درصد نسبت به راندمان در APF با سوئیچینگ سخت بهبود یافته است. THD در APF با سوئیچینگ نرم پیشنهادی در حدود ۰/۱۸ که در مقایسه با مقدار آن در APF با سوئیچینگ سخت تفاوتی ندارد و این امر بیانگر عدم تاثیرات مخرب مدار کمکی در APF با سوئیچینگ نرم بر روی مقادیر THD می باشد. این مبدل با استفاده از کمترین المان های کمکی، به نحو بهینه کیفیت مبدل سه فاز سیستم APF را ارتقا می بخشد. کم شدن حجم مداری و المان های مورد استفاده موجب کاستن از هزینه های اقتصادی ساخت یا استفاده از این سیستم پیشنهادی است.

منابع

[1] K. Eichert, T. Mangold, M. Weinhold, "Power Quality Issues and their Solution", in *VII Seminariode Electrónica de Potencia*, Valparaíso, Chile, Abril 1999.