

منابع تغذیه بدون وقفه دوتبدیله قابل انعطاف

سیدرضا موحد قدسی نیا^۱، دانشجوی دکتری؛ علی یزدیان ورجانی^۲، استادیار؛ مصطفی محمدیان^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران - sr.movahhed@modares.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران - yazdian@modares.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران - mohamadian@modares.ac.ir

چکیده: افزایش ظرفیت منبع تغذیه بدون وقفه دوتبدیله در پاسخ به افزایش بار با تعویض UPS یا موازی سازی امکان پذیر است که موجب تحمیل هزینه می شود. در این مقاله روشی برای افزایش ظرفیت سامانه UPS دوتبدیله پیشنهاد می شود. این روش بدون تحمیل هزینه قابل توجه، توان UPS را به دو برابر افزایش می دهد. این روش بر تغییر پیکربندی UPS دوتبدیله استوار است. در آرایش پیشنهادی علاوه بر اینکه ظرفیت جبران اختلالات شبکه و بار افزایش یافته است، به هنگام قطع شبکه توان بار میان دو مبدل تقسیم می شود. همچنین این تغییر آرایش علاوه بر افزایش توان سامانه، ویژگی های مثبت آرایش دوتبدیله را در جبران سازی اختلالات بار و شبکه نیز حفظ می کند. این امر با استفاده از شبیه سازی رفتار UPS تغییر آرایش داده شده نشان داده شده است.

واژه های کلیدی: منابع تغذیه بدون وقفه دوتبدیله، موازی سازی اینورترها، کیفیت توان، افزایش توان نامی.

Flexible Double Conversion Uninterruptible Power Supply

S. R. Movahhed Ghodsinya¹, PhD Student; A. Yazdian², Assistant Professor; M. Mohamadian³, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, sr.movahhed@modares.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, yazdian@modares.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, mohamadian@modares.ac.ir

Abstract: By increasing the load of the double conversion uninterruptible power supply, their nominal power should increase, this could happen through paralleling of other UPS or changing the current one, which both of these have a cost effect. In this paper a new method for increasing the nominal power of the double conversion UPS is proposed, which could increase the UPS power up to 200%. This method is based on reconfiguration of the mentioned UPS. This proposed configuration not only could compensate the load and network perturbation during normal operation, but also in the absence of the network the two inverter could handle the load with each other. The proposed method is validate through simulation results.

Keywords: Double conversion UPS, inverter paralleling, power quality, increase nominal power.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۳ و ۱۳۹۵/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۳۰

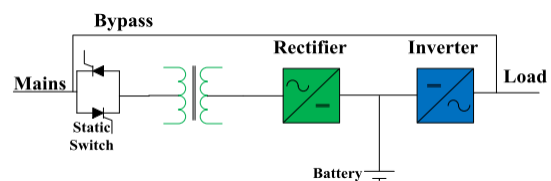
نام نویسنده مسئول: علی یزدیان ورجانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

ایجاد و گسترش استفاده از بارهای حساس از قبیل تجهیزات مورد استفاده در فن آوری اطلاعات، سامانه‌های مخابراتی و تجهیزات پزشکی در کنار مسائل مرتبط با کیفیت توان موجب گسترش استفاده از منابع تغذیه بدون وقفه شده است [۱، ۲]. شبکه قدرت موجود قادر به تأمین توان با قابلیت اطمینان بالا و کیفیت مطلوب برای بارهای حساس نبوده و بروز مشکلاتی از قبیل کمبود، بیش‌بود، فلیکر ولتاژ، هارمونیک‌ها و ولتاژ، خطاها و خاموشی‌های با برنامه و بدون برنامه همواره محتمل است [۳]. منابع تغذیه بدون وقفه، توان با کیفیت، مطمئن و بی‌وقفه را برای بارهای حساس فراهم می‌کنند [۴، ۵]. اغلب UPS ها و به‌خصوص نوع دوتبدیله بالقوه قادر به جبران مشکلات شبکه از قبیل اعوجاج هارمونیک، نویز، کم‌بود و بیش‌بود هستند [۶، ۷]. این تجهیزات همچنین از بار در برابر اضافه ولتاژ، افت ولتاژ و قطع توان حفاظت کرده، حالات گذرا و هارمونیک‌های خط را کاهش می‌دهند [۸].

UPS های دوتبدیله که از پرکاربردترین انواع UPS به‌شمار می‌روند، از دو اینورتر، باتری و یک کلید ایستا (کنارگذر) تشکیل شده‌اند [۹]. شکل ۱ ساختار UPS دوتبدیله را نشان می‌دهد. در UPS دوتبدیله توان ac همواره ابتدا توسط مبدل ورودی یکسو شده و باس dc را تغذیه می‌کند. توان موردنیاز بار از طریق باس dc و توسط مبدل خروجی تأمین می‌شود. در نتیجه مبدل ورودی باید بتواند کل توان موردنیاز بار و شارژ باتری را فراهم کند. توان نامی اینورترها به اندازه توان نامی بار است [۱۰]. بنابراین در صورت افزایش توان موردنیاز بار، باید ظرفیت هر دو مبدل ورودی و خروجی افزایش داده شود. این کار با تعویض مبدل‌ها به مبدل‌های توان بالاتر یا موازی سازی آن‌ها امکان‌پذیر است. در این مقاله به‌منظور کاهش هزینه‌ها، روشی برای تغییر پیکربندی UPS دوتبدیله جهت پاسخ‌گویی به افزایش توان بار پیشنهاد خواهد شد.



شکل ۱: ساختار UPS دوتبدیله [۱۱]

این مقاله در شش بخش تنظیم شده است. در ادامه اصول عملکرد UPS دوتبدیله شرح داده می‌شود. در سومین بخش پیکربندی پیشنهادی برای افزایش ظرفیت UPS دوتبدیله مطرح می‌گردد و در بخش چهارم روش تغییر پیکربندی UPS دوتبدیله به پیکربندی پیشنهادی بیان می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای نشان دادن کارآمدی سامانه تغییر وضعیت داده‌شده در بخش پنجم ارائه شده است و در نهایت نتیجه‌گیری کلی ارائه خواهد شد.

۲- پیکربندی UPS دوتبدیله

امروزه UPS های دوتبدیله از پرکاربردترین انواع UPS ها به‌شمار می‌روند. این کاربرد وسیع ناشی از ویژگی‌های مثبت این ساختار از قبیل حفاظت کامل بار در مقابل اختلالات شبکه و نیز جلوگیری از اثرگذاری بار روی شبکه است. چنانکه در شکل ۱ ملاحظه می‌شود این UPS از دو مبدل مشابه با ظرفیت تقریباً برابر تشکیل شده است. یکی از این مبدل‌ها نقش یکسوسازی و دیگری نقش اینورتری را برعهده دارد.

UPS های دوتبدیله دو حالت کاری دارند. در حالت کار عادی (هنگام وجود شبکه) توان بار از طریق دو مبدل تأمین می‌شود؛ درواقع آنچه رخ می‌دهد تبدیل دومرحله‌ای توان از متناوب به مستقیم و مجدداً از مستقیم به متناوب است. این کار امکان بهسازی توان را فراهم می‌کند. از آنجاکه مبدل ورودی علاوه بر تغذیه بار و اصلاح ضریب توان موظف به شارژ باتری نیز است [۱۲]، بالاترین ظرفیت توانی را در این مجموعه داراست که منجر به افزایش قیمت می‌گردد [۱۳].

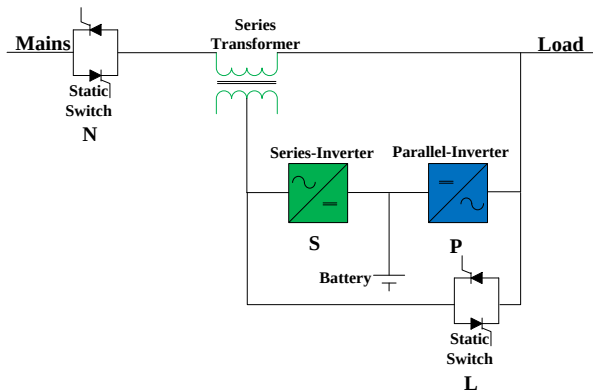
به هنگام قطع شبکه یا بروز نوسانات ولتاژی فراتر از مقادیر مجاز، تغذیه بار بدون هیچ وقفه‌ای توسط مبدل خروجی و باتری میسر می‌شود و تا بازگشت دوباره خط یا تخلیه باتری ادامه می‌یابد. به این ترتیب توان مبدل خروجی که به‌صورت اینورتر کار می‌کند، باید حداقل برابر با توان بار باشد.

UPS های دوتبدیله چه در حالت کار عادی و چه در حالت ذخیره انرژی، حفاظت دائمی از بار را فراهم می‌کند. در این پیکربندی نوسانات شبکه به بار انتقال پیدا نکرده و دامنه خطای ولتاژ ورودی گسترده و دقت تنظیم ولتاژ خروجی بالاست [۱۴]. این ساختار از عملکرد بسیار مطلوبی چه در کار دائمی و چه در شرایط گذرا برخوردار است و در صورت قطع برق، انتقال به حالت کاری ذخیره انرژی به صورت بلادرنگ صورت می‌پذیرد.

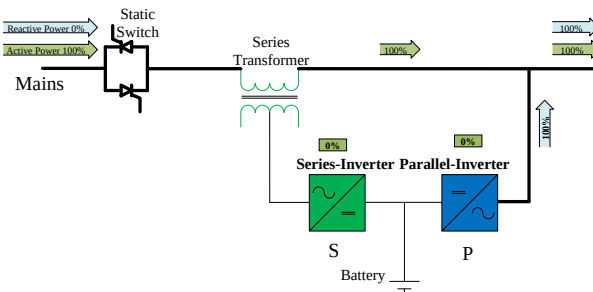
در UPS های دوتبدیله از آنجاکه مبدل ورودی علاوه بر تأمین بار توان موردنیاز شارژ باتری را هم فراهم می‌کند، باید از توان نامی بالاتری برخوردار باشد. این امر برای حصول اطمینان خاطر از عدم تخلیه باتری در حالت کار عادی الزامی می‌نماید. از جمله ایرادات این نوع از UPS این است که وجود دو مبدل در نرخ توانی معادل توان بار به افزایش هزینه ساخت می‌انجامد. به‌علاوه شارش کل توان بار از یکسوساز و اینورتر در حالت کار عادی منجر به تلفات اضافی و کاهش راندمان می‌شود [۱۵].

از آنجاکه ظرفیت مبدل‌ها در UPS دوتبدیله تقریباً برابر ظرفیت بار است، در صورت افزایش توان بار بیش از ظرفیت مبدل‌ها، UPS دیگر قادر به تأمین بار نخواهد بود. برای حل این مشکل و تأمین بار دو روش وجود دارد. به این منظور یا می‌بایست UPS با یک نمونه توان بالاتر تعویض شود و یا اینکه با یک UPS دیگر موازی شود. هر دوی این روش‌ها مستلزم صرف هزینه زیاد هستند. در ادامه این مقاله روشی

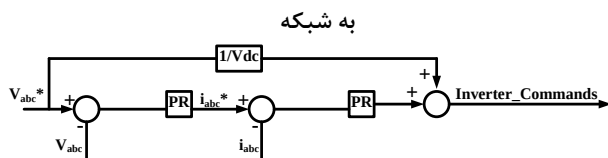
خروجی اینورتر تولید شده و خطای جریان هم با عبور از کنترل کننده تنظیم شده، فرمان کلیدزنی اینورتر موازی را تولید می کند. برای افزایش سرعت پاسخ حلقه کنترلی یک خط پیش خور هم بین فرمان ولتاژ و فرمان کلیدزنی اینورتر برقرار شده است.



شکل ۲: آرایش منبع تغذیه پیشنهادی



شکل ۳: نمودار انتقال توان در منبع تغذیه پیشنهادی هنگام وصل بار



شکل ۴: حلقه کنترلی اینورتر موازی در حالت عملکرد عادی

اینورتر سری در شرایط وجود شبکه به گونه ای عمل می کند که جریان شبکه بدون هارمونیک و ضریب توان برابر یک باشد. باید توجه شود که این کار موجب می شود که توان هارمونیک و راکتیو بار توسط اینورتر موازی تأمین شود. علاوه بر این، اینورتر سری وظیفه تنظیم ولتاژ باس dc را نیز بر عهده دارد.

شکل ۵ بلوک دیاگرام کنترلی اینورتر سری را نشان می دهد. همان گونه که در حلقه کنترلی اینورتر سری دیده می شود، پس از انتقال جریان بار ($i_{abc-load}$) به قاب مرجع dq0 مؤلفه d آن تحویل کنترل کننده جریان می شود تا تنها مؤلفه توان اکتیو بار از شبکه تأمین گردد. با حذف مؤلفه های q و 0 جریان بار از جریان شبکه، از انتقال توان راکتیو از شبکه به بار و نیز هارمونیک شدن جریان شبکه جلوگیری می شود. برای کنترل ولتاژ باس dc (V_{dc}) و تأمین توان مورد نیاز برای شارژ باتری، خروجی کنترل کننده ولتاژ باس به مؤلفه d جریان بار اضافه می شود.

برای حل این مشکل براساس تغییر پیکربندی، پیشنهاد خواهد شد. این پیکربندی در بخش بعد توضیح داده می شود.

باید توجه شود که برای افزایش توان یک UPS لازم است تبدیل ها و باتری آن افزایش یابد. از آنجاکه لازم است توان باتری برابر توان بار باشد بنابراین افزایش ظرفیت باتری برای افزایش ظرفیت UPS یک ضرورت است و امکان گریز از آن وجود ندارد. روش پیشنهادی این مقاله تلاشی در جهت کاهش هزینه افزایش ظرفیت UPS در بخش تبدیل ها (جایی که با توجه به روش پیشنهادی امکان آن وجود داشته است) بوده است.

بنابراین اگرچه ساختار پیشنهادی هزینه باتری را کاهش نمی دهد (که اساساً امکان کاهش آن وجود ندارد) اما با کاهش هزینه های مربوط به تبدیل هزینه های کلی مورد نیاز برای افزایش ظرفیت را کاهش داده است.

۳- پیکربندی پیشنهادی برای افزایش ظرفیت UPS دوتبدیل

در صورت افزایش میزان توان باری که توسط UPS دوتبدیل تغذیه می شود یا باید UPS با نمونه توان بالاتر تعویض شود و یا با یک UPS دیگر موازی گردد. هر دو این روش ها منجر به تحمیل هزینه اضافه می گردند. برای حل این مشکل و درعین حال افزایش ظرفیت UPS در این قسمت یک پیکربندی جدید ارائه شده است که می توان آن را به کمک تغییرات کوچکی در پیکربندی UPS دوتبدیل ایجاد نمود.

ساختار پیشنهادی متشکل از دو تبدیل با ظرفیت یکسان بوده و مشابه تمامی UPS ها دو حالت کاری تغذیه بار توسط شبکه و حالت خطا، یعنی تغذیه بار توسط باتری (حالت ذخیره انرژی) دارد.

شکل ۲ آرایش پیشنهادی را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در این ساختار شامل دو اینورتر سری و موازی (اصلی) است. اینورتر سری از طریق یک کلید استاتیک (L) با اینورتر اصلی موازی شده است. این کلیدها پس از قطع شبکه و در اولین گذر از صفر ولتاژ خروجی اینورتر موازی، دو اینورتر را باهم موازی می کنند. در ادامه نحوه کار این پیکربندی در دو حالت کاری توضیح داده می شود.

۳-۱- شرایط متصل به شبکه

در حالت کار عادی که تغذیه بار از طریق شبکه انجام می شود، کلید استاتیک (N) در شکل بسته و کلید (L) باز است. نحوه شارش توان در این حالت مشابه شکل ۳ است.

در این وضعیت اینورتر موازی تثبیت ولتاژ بار را بر عهده دارد. ولتاژ بار باید بدون توجه به خطی یا غیرخطی بودن بار و نیز وقوع کمبود یا بیش بود در ولتاژ شبکه در مقدار مطلوب تثبیت شود. این کار با استفاده از حلقه کنترلی شکل ۴ انجام می شود. در این حلقه کنترلی با عبور خطای ولتاژ از کنترل کننده تناسبی-رزونانسی (PR)، مرجع جریان

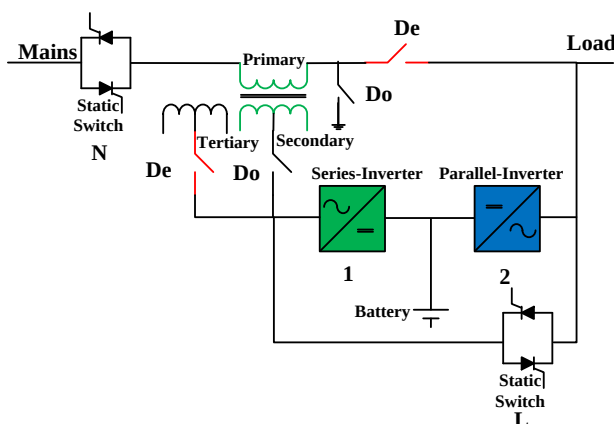
Serial no. 82

در صورت بسته بودن هر دو کلید Do و باز بودن هر دو کلید De سیم‌پیچ ثالثیه از مدار خارج شده و ترانسفورمر موجود یک ترانسفورمر دو سیم‌پیچه ایزوله خواهد بود و ساختار UPS مشابه یک UPS دوتبدیله می‌شود (شکل ۱) و به‌عکس در صورت باز بودن هر دو کلید Do و بسته بودن هر دو کلید De آرایش مدار به‌کمک سیم‌پیچ سوم ترانسفورمر به آرایش پیشنهادی تغییر وضعیت می‌دهد (شکل ۲).

در حالتی که کلید De بسته و Do باز باشد، سیم‌پیچ اولیه به‌طور سری در مدار قرار می‌گیرد و سیم‌پیچ ثانویه از مدار خارج می‌شود. سیم‌پیچ ثالثیه که تعداد دور آن نصف اولیه است در این حالت وارد مدار شده و به‌این ترتیب ساختار UPS مشابه ساختار پیشنهادی (شکل ۲) می‌شود.

چنانکه عنوان شد کلیدهای De و Do می‌توانند دستی باشند و در حالتی که UPS کار نمی‌کند قطع و وصل می‌شوند. کلید قطع‌کننده شبکه (کلیدهای استاتیک N) در همه UPS‌ها وجود دارد و تنها کلیدهای نیمه‌هادی سریع اضافه‌شده، کلیدهای موازی‌کننده دو اینورتر است. این کلیدها کلیدزنی دائم انجام نمی‌دهند لذا قیمت تمام‌شده این کلیدها در مقایسه با هزینه مورد نیاز برای تعویض و افزایش ظرفیت مبدل‌ها قابل صرف‌نظر است.

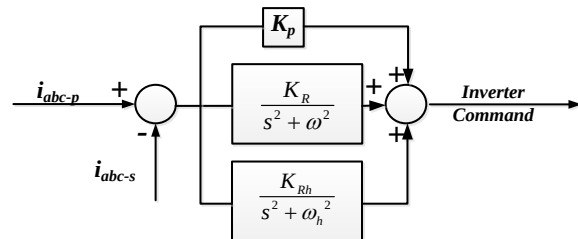
همان‌گونه که بیان شد کلیدهای De و Do در شکل ۸ هنگام خاموش بودن UPS آرایش آن را از دوتبدیله به آرایش پیشنهادی تغییر می‌دهند؛ بنابراین ترانسفورمر در هنگام کار کلیدزنی نمی‌شود. کلید قطع‌کننده شبکه (N) نیز در ساختار متداول UPS دوتبدیله وجود دارد و ساختار پیشنهادی از این نظر تفاوتی با ساختارهای متداول ندارد. چنان‌که در قسمت قبل بیان شد، در پیکربندی پیشنهادی، به‌دلیل هم‌ظرفیت شدن دو مبدل، امکان جبران نوسانات، هارمونیک‌ها و سایر اختلالات شبکه و نیز جلوگیری از انتقال اثرات نامطلوب بار به شبکه افزایش یافته است؛ بنابراین تغییر آرایش UPS از دوتبدیله به آرایش پیشنهادی اثر نامطلوبی در بار و شبکه ایجاد نخواهد کرد. شبیه‌سازی‌های انجام شده در بخش بعد این مطلب را به‌وضوح نشان می‌دهد.



شکل ۸: روش تغییر پیکربندی UPS دو تبدیله به پیکربندی پیشنهادی

امکان تغییر چیدمان مبدل‌ها برای تغییر از آرایش UPS دوتبدیله به پیکربندی پیشنهادی وجود دارد.

با انجام این تغییر، مشابه آن چه در توضیح حالت های پیکربندی پی‌شنهادی در قسمت های قبل بیان شد، در حالت عادی بار از شبکه تغذیه شده و در حالت قطع شبکه نیز دو مبدل UPS با یکدیگر موازی شده و امکان تغذیه باری تا دو برابر ظرفیت هر یک از مبدل ها را فراهم می کند و این به معنای امکان پوششش باری تا دو برابر توان نامی UPS دوتبدیله است.



شکل ۷: بلوک دیاگرام کنترل اینورتر سری هنگام موازی شدن

آنچه انجام این تغییر را توجیه پذیرتر می‌کند آن است که در UPS دوتبدیله دو مبدل ظرفیت تقریباً یکسانی دارند و این برای پیکربندی پیشنهادی کاملاً مناسب است. برای تراز سفورمر سری‌کننده اینورتر سری، امکان استفاده از ترانسفورماتور ورودی UPS دوتبدیله با افزودن سیم‌پیچ ثالثیه با تعداد دور مناسب وجود دارد. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که در UPS دوتبدیله نسبت تعداد دورهای ترانسفورمر ۱:۱ است اما در پیکربندی پیشنهادی نسبت تعداد دورهای ترانسفورمر ۱:۲ است فلذا می‌بایست از سیم‌پیچ سوم استفاده نمود. این موضوع هرچند تبعات مالی دارد لیکن هزینه اضافه کردن یک ترانسفورمر جدید در مقایسه با هزینه تعویض کل UPS یا تهیه یک UPS برای موازی‌سازی ناچیز است.

چنانچه امکان این تغییر پیکربندی از آغاز در ساختار UPS دوتبدیله در نظر گرفته شود انجام آن بسیار راحت تر و سریع تر شده و نیازی به فرد متخصص نخواهد داشت. به این منظور لازم است که ترانسفورمر ورودی UPS دوتبدیله سه سیم پیچه باشد که سیم پیچ سوم برای اتصال سری اینورتر سری استفاده شود. در ضمن کلیدهای استاتیک مناسب نیز باید استفاده گردد. از آنجاکه این تغییر پیکربندی از آرایش دوتبدیله به آرایش پیشنهادی حین کار UPS انجام نمی شود، کلیدهای انجام تغییر آرایش می توانند رله های غیرسریع یا حتی کلیدهای مکانیکی دستی نیز باشند. شکل ۸ نحوه تغییر این آرایش را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۸ مشخص است در صورت بسته شدن کلیدهای Do و باز بودن کلیدهای De آرایش UPS دوتبدیله در صورت باز شدن کلیدهای Do و بسته بودن کلیدهای De آرایش پیشنهادی را خواهیم داشت.

باید توجه کرد که در هر لحظه می‌بایست تنها یکی از مجموعه کلیدهای De با Do روشن باشند.

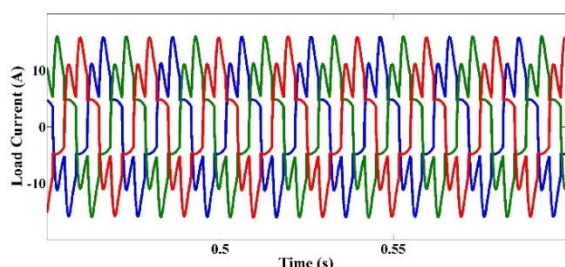
۵- نتایج شبیه سازی

برای بررسی کارآمدی تغییر پیکربندی پیشنهادی، در دو بخش شبیه سازی هایی توسط نرم افزار متلب-سیمولینک انجام شده است. در بخش اول شبیه سازی، ولتاژ شبکه هارمونیک است به علاوه این ولتاژ در لحظه $t=0/5$ s دچار افت ولتاژ نامتعادل نیز می شود و از سوی دیگر بار نیز غیرخطی و به شدت هارمونیک است. این شبیه سازی برای بررسی عملکرد جبران سازی اختلالات شبکه و بار توسط UPS انجام شده است. در بخش دوم شبیه سازی، در لحظه $t=1$ s به علت وجود خطا در شبکه، UPS بار را از شبکه جدا کرده و از باتری تغذیه می کند. در این حالت نیز بار هارمونیک است و در هر دو حالت بیان شده شبیه سازی در بار کامل، نیمه بار و بار کم صورت پذیرفته است. مقادیر مورد استفاده در شبیه سازی در جدول ۱ آمده است.

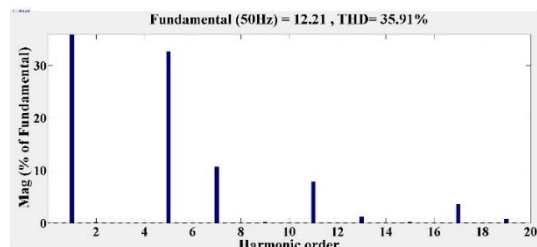
جدول ۱: مشخصات شبیه سازی انجام شده

مشخصات	مقدار
فیلتر اینورتر سری	۶ میلی هانری - ۲۲ میکروفاراد
فیلتر اینورتر موازی	۶ میلی هانری - ۲۲ میکروفاراد
ولتاژ باس dc	۷۴۰ ولت
فرکانس کلیدزنی	۱۰ کیلوهرتز
نوع بار	یکسوساز دیودی سه فاز
توان ظاهری بار	۵/۷ کیلووات
ضریب توان بار	۰/۷
توان نامی اینورترها	۲/۹ کیلووات

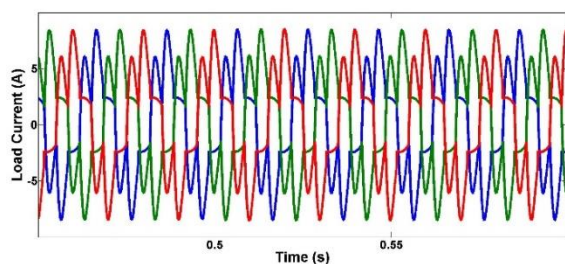
شکل ۹-الف و ب جریان بار و محتوای هارمونیک این جریان را در بار کامل نشان می دهد. سایر قسمت های شکل ۹ جریان بار و محتوای هارمونیک آن را برای شرایط نیمه بار و بار کم نشان می دهند. همان طور که دیده می شود بار به شدت غیرخطی است.



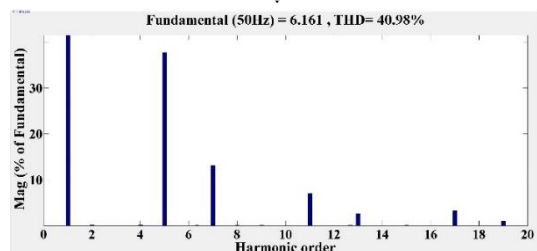
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

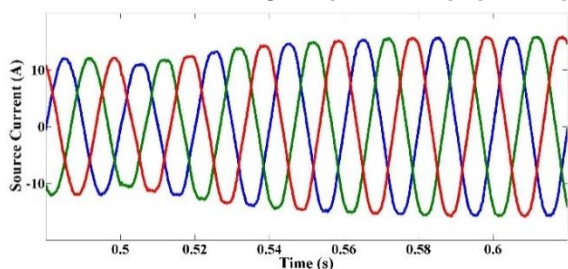
برای داشتن ولتاژ ۳۸۰ ولت سه فاز در خروجی اینورتر با اندیس مدولاسیون ۰/۸۵ ضروری است که ولتاژ باس ۷۴۰ ولت باشد. بدیهی است که امکان کاهش سطح ولتاژ باس با افزایش اندیس مدولاسیون وجود دارد اما این مطلب منجر به کاهش توانایی سیستم کنترلی در جبران سازی خطاهای احتمالی خواهد شد. در هر حال ساختار پیشنهادی از نظر ولتاژ باس و اندیس مدولاسیون هیچ گونه تفاوتی با ساختارهای متداول نداشته و می تواند ولتاژ باس مشابه آن ها داشته باشد. تعداد باتری های مورد نیاز برای رسیدن به سطح ولتاژ باس DC و توان بار نیز در ساختار پیشنهادی کاملاً مشابه ساختارهای متداول UPS است. باتری مورد استفاده در شبیه سازی از نوع سرب-اسید با ظرفیت ۱۰ آمپر-ساعت بوده است.

۵-۱- شبیه سازی جبران سازی بار و شبکه

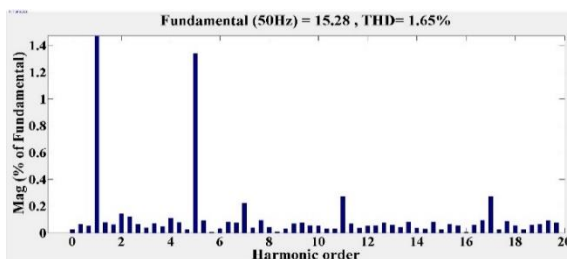
در حالت عادی اینورتر سری اصلاح ضریب توان و حذف هارمونیک ها از جریان بار را بر عهده دارد؛ بنابراین در صورتی که بار غیرخطی و دارای توان راکتیو باشد، عملکرد این حلقه کنترلی به خوبی آزمایش می شود. از سویی اینورتر موازی می بایست ولتاژ سینوسی متعادل با دامنه مناسب برای بار تأمین کند. کارآمدی کنترل این اینورتر نیز در صورت هارمونیک بودن ولتاژ شبکه و ایجاد نوسان ولتاژ در آن، قابل بررسی است. برای بررسی عملکرد UPS در این شرایط از بار هارمونیک با اعوجاج هارمونیک کل ۳۵٪ (برای بار کامل) استفاده شده است.

چنان که در شکل ۱۰-الف، ب و ج که توان اکتیو و راکتیو بار برای هر سه حالت بار کامل، نیمه بار و بار کم را نشان می دهند، مشاهده می شود ضریب توان بار تقریباً برابر ۰/۷ است. مبدل سری، در این وضعیت، سعی در جلوگیری از ورود هارمونیک های بار به شبکه و نیز تصحیح ضریب توان دارد. شکل ۱۱ جریان شبکه و محتوای هارمونیک آن را برای بار کامل، نیمه بار و بار کم به ترتیب نشان می دهد، با توجه به شکل ۱۱ موفقیت عملکرد این مبدل در کنترل هارمونیک جریان شبکه به وضوح قابل مشاهده است.

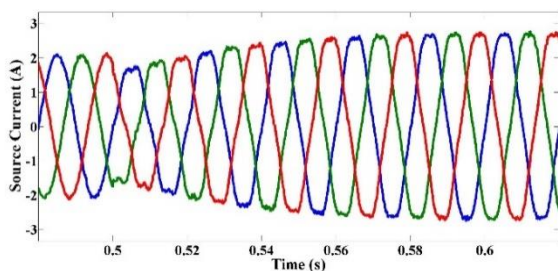
البته پر واضح است که دلیل افزایش هارمونیک‌ها در بار کم‌تر به علت وجود رابطه معکوس بین اندیس مدولاسیون و میزان هارمونیک است. شکل ۱۲ توان اکتیو و راکتیو تحویلی از شبکه به بار را برای هر سه حالت بار کامل، نیمه‌بار و بار کم نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، تمام توان اکتیو موردنیاز بار توسط شبکه تأمین می‌شود؛ اما توان راکتیو کشیده‌شده از شبکه در تمامی حالات در حد صفر است که این نشان‌دهنده موفقیت اینورتر سری در تصحیح ضریب توان است. با افت ولتاژ شبکه ابتدا توان تزریقی از شبکه به بار کاهش می‌یابد. از آنجاکه اینورتر موازی می‌بایست ولتاژ بار را ثابت نگه دارد، لذا باید کاهش ولتاژ شبکه را جبران کند. این کار منجر به افت ولتاژ باس dc می‌شود. با افت ولتاژ باس کنترل‌کننده اینورتر سری وارد عمل شده و جریان دریافتی از شبکه را افزایش می‌دهد تا از افت ولتاژ باس dc جلوگیری کند که این امر باعث افزایش توان دریافتی از شبکه می‌گردد. با بازگشت توان شبکه به مقدار قبل از خطا، افت ولتاژ باس متوقف می‌شود و مجدداً تمام توان اکتیو بار را شبکه تأمین خواهد کرد. لحظاتی که توان شبکه از توان اکتیو بار بیش‌تر می‌شود به‌منظور جبران افت ایجاد شده در باس dc است. برای بررسی عملکرد اینورتر موازی در حفظ ولتاژ بار در لحظه $t=0/5s$ ولتاژ شبکه هارمونیک‌ی شده و نیز دچار افت نامتعادل می‌شود. شکل ۱۳ ولتاژ شبکه را نشان می‌دهد (تغییرات ولتاژ شبکه در هر سه حالت بار یکسان است).



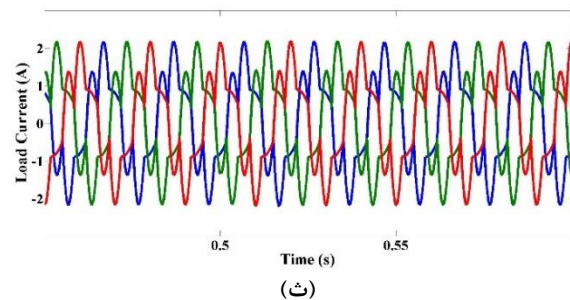
(الف)



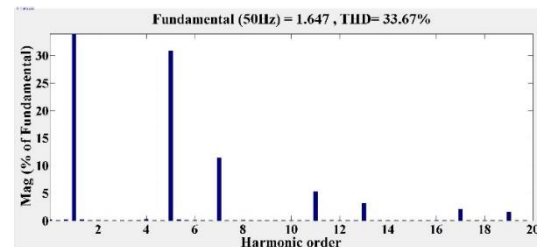
(ب)



(پ)

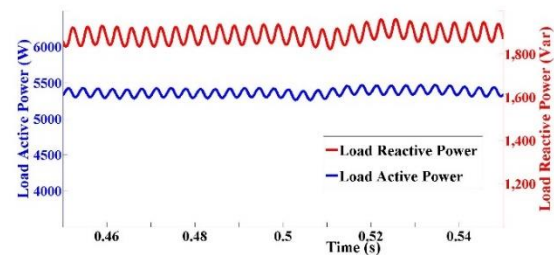


(ث)

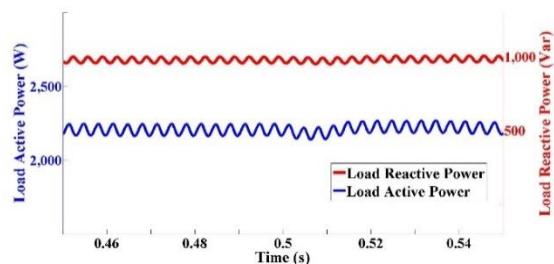


(ج)

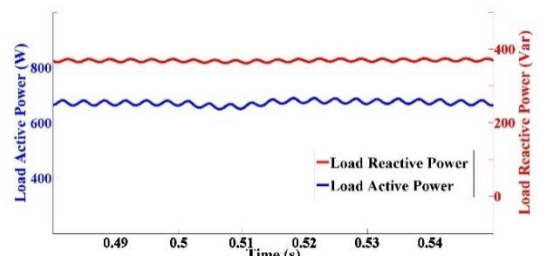
شکل ۹: (الف) جریان بار کامل، (ب) THD جریان بار کامل، (پ) جریان نیمه بار، (ت) THD جریان نیمه‌بار، (ث) جریان بار کم، (ج) THD جریان بار کم



(الف)

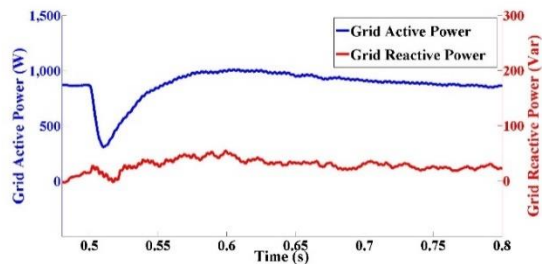


(ب)



(پ)

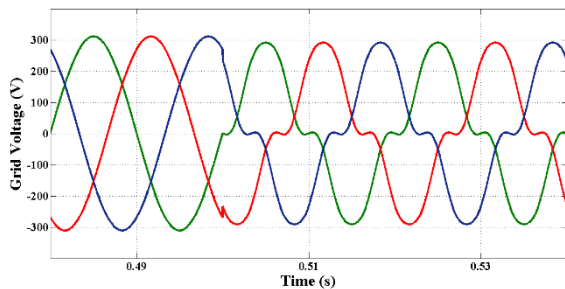
شکل ۱۰: (الف) توان اکتیو و راکتیو بار در حالت کارکرد عادی (بار کامل)، (ب) توان راکتیو و راکتیو بار در حالت کارکرد عادی (نیمه‌بار)، (پ) توان راکتیو و راکتیو بار در حالت کارکرد عادی (بار کم)



(پ)

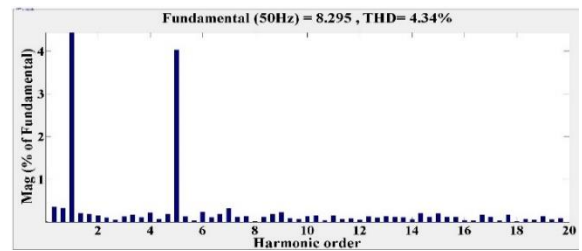
شکل ۱۲: الف) توان اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه (بار کامل)، ب) توان اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه (نیمه بار)، پ) توان اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه (بار کم)

شکل ۱۴-الف ولتاژ بار را قبل و در حین وقوع اختلال در ولتاژ شبکه و شکل ۱۴-ب طیف هارمونیک این ولتاژ را نشان می‌دهد. شکل موج ولتاژ بار در حالت نیمه بار و بار کم نیز همانند شکل ۱۴-الف است. و طیف هارمونیک این ولتاژها نیز با اختلاف بسیار اندکی یکسان است. همان گونه که مشاهده می‌شود ولتاژ بار علیرغم وجود هارمونیک و افت در ولتاژ شبکه عاری از هارمونیک و افت ولتاژ بوده و هارمونیک‌های تولیدی بار تأثیری بر روی آن نداشته‌اند. این مطلب نشان‌دهنده موفقیت اینورتر موازی در تثبیت ولتاژ بار است. از آنجاکه قبل و بعد از قطع شبکه اینورتر موازی وظیفه کنترل ولتاژ بار را برعهده دارد و الگوریتم کنترلی آن نیز پیش و پس از قطع شبکه یکسان است؛ بنابراین در صورت صحت عملکرد آن، با قطع و وصل شبکه ولتاژ باس بار دچار تغییر نخواهد شد.

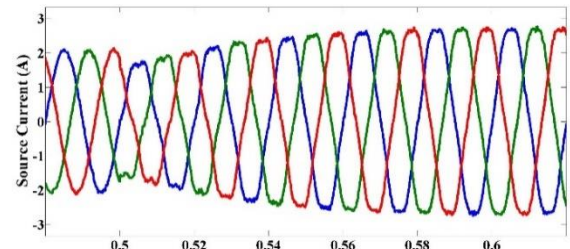


شکل ۱۳: شکل موج ولتاژ شبکه

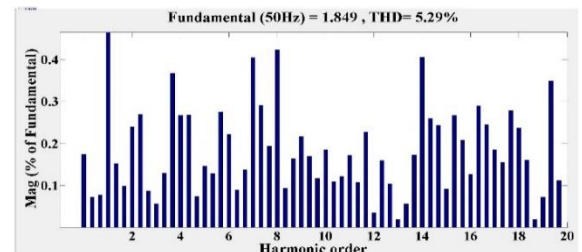
آنچه که موجب توفیق اینورتر موازی در تنظیم ولتاژ بار می‌شود الگوریتم کنترلی آن است. در این الگوریتم کنترلی، کنترل کننده PR (مشابه شکل ۸) برای هر هارمونیک، یک جبران ساز مجزا دارد. بسته به اهمیت هارمونیک‌ها، این کنترل کننده‌های رزونانسی می‌توانند تا هارمونیک هفتم، نهم یا بالاتر تنظیم شوند. به این ترتیب اینورتر موازی قادر به تنظیم ولتاژ بار حتی در شرایط بار غیرخطی است.



(ت)

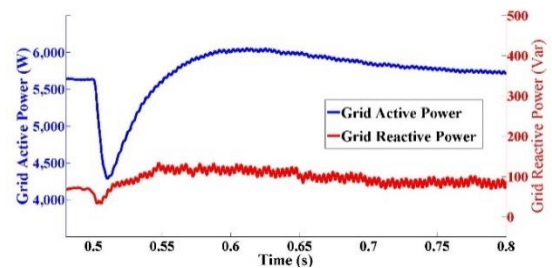


(ث)

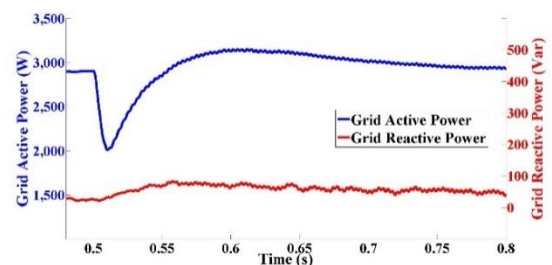


(ج)

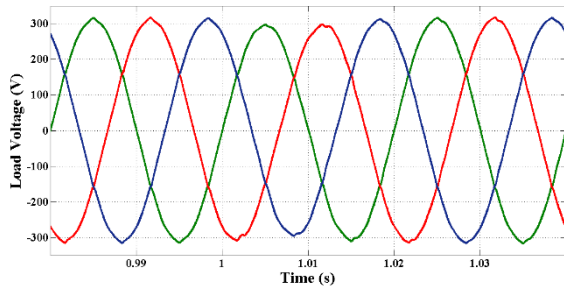
شکل ۱۱: الف) جریان شبکه (بار کامل)، ب) محتوای هارمونیک جریان شبکه (بار کامل)، پ) جریان شبکه (نیمه بار)، ت) محتوای هارمونیک جریان شبکه (نیمه بار)، ث) جریان شبکه (بار کم)، ج) محتوای هارمونیک جریان شبکه (بار کم)



(الف)



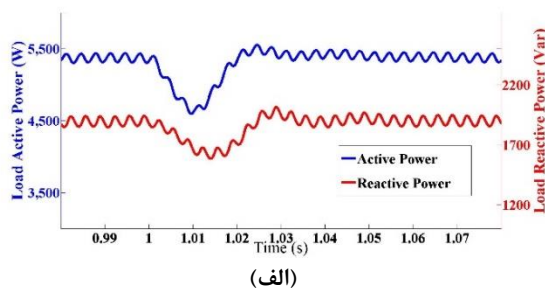
(ب)



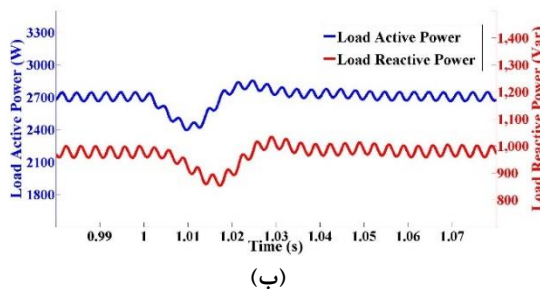
شکل ۱۵: ولتاژ بار در حالت قطع شبکه

چنان که دیده می‌شود تغییر مد کاری UPS روی ولتاژ بار و در نتیجه جریان آن اثر منفی نداشته است و تغذیه بار بدون وقفه ادامه پیدا کرده است. علت این عدم حساسیت به قطع شدن شبکه درستی عملکرد اینورتر موازی است که همواره (قبل و بعد از قطع شبکه) وظیفه کنترل ولتاژ بار را برعهده دارد.

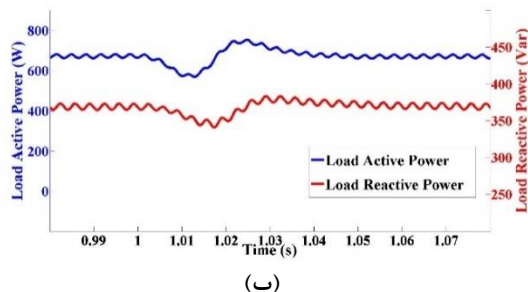
شکل ۱۶ توان اکتیو و راکتیو بار را در سه حالت بار کامل، نیمه‌بار و بار کم نشان می‌دهد. این شکل هم عدم وقوع وقفه در تغذیه بار را نشان می‌دهد.



(الف)

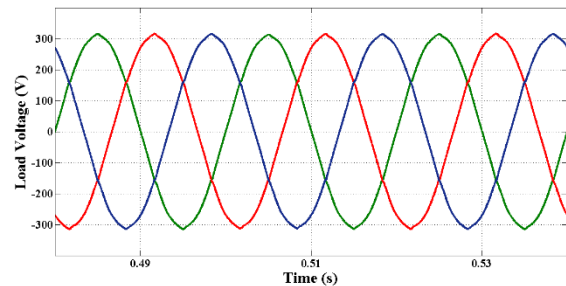


(ب)

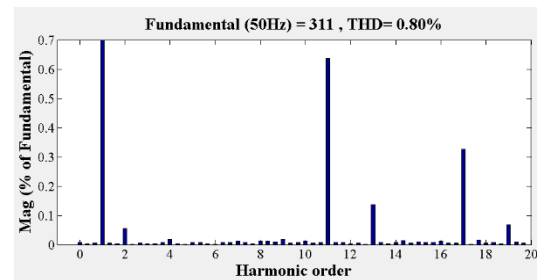


(پ)

شکل ۱۶: (الف) توان اکتیو و راکتیو بار در حالت قطع شبکه (بار کامل)، (ب) توان اکتیو و راکتیو بار در حالت قطع شبکه (نیمه‌بار)، (پ) توان اکتیو و راکتیو بار در حالت قطع شبکه (بار کم)



(الف)



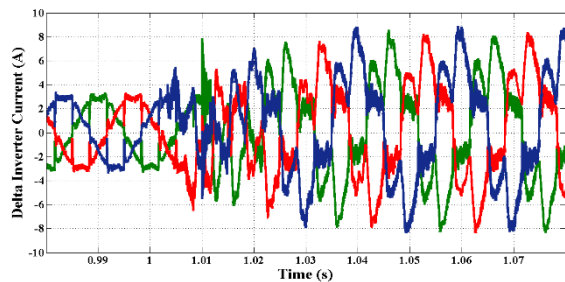
(ب)

شکل ۱۷: (الف) ولتاژ بار (بار کامل)، (ب) محتوای هارمونیک ولتاژ بار (بار کامل)

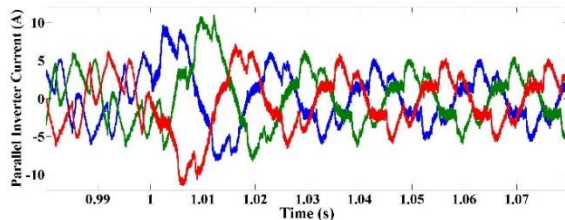
همان‌گونه که نتایج شبیه‌سازی‌های این بخش نشان داد، در حالت تغذیه از شبکه، با عملکرد مناسب اینورترهای سری و موازی اختلالات بار و شبکه به یکدیگر منتقل نمی‌شود. این کاملاً مشابه رفتار آرایش UPS دوتبدیل است؛ بنابراین در این حالت تغییر آرایش، روی عملکرد کلی سامانه اثر نامطلوبی ندارد.

۵-۲- شبیه‌سازی قطع از شبکه

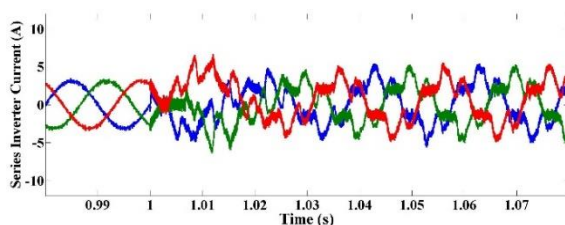
در این بخش از شبیه‌سازی در لحظه $t=1s$ شبکه قطع شده و بار با استفاده از باتری تغذیه می‌شود. هم‌زمان با قطع شبکه کلیدهای استاتیک N بازمی‌گردند و کلیدهای استاتیک L (شکل ۶) عمل کرده و نهایتاً دو اینورتر موازی می‌شوند. به‌علاوه الگوریتم کنترلی اینورتر سری هم تغییر می‌کند. در این وضعیت اینورتر موازی ارباب و اینورتر سری برده می‌شود. الگوریتم کنترلی اینورتر سری در این حالت مشابه شکل ۷ است. الگوریتم کنترل اینورتر موازی تغییر نخواهد کرد و این مبدل همچنان وظیفه کنترل ولتاژ بار را برعهده دارد. این عدم‌تغییر در الگوریتم کنترلی اینورتر موازی از ایجاد گذراها در ولتاژ بار جلوگیری می‌کند. شکل ۱۵ ولتاژ بار را قبل و بعد از قطع شبکه نشان می‌دهد (شکل ولتاژ در حالت نیمه‌بار و بار کم نیز یکسان است). شکل ۱۵ نشان می‌دهد که تغییر آرایش UPS (قطع شبکه و موازی شدن دو اینورتر) و تغییر الگوریتم کنترلی اینورتر سری اثری روی شکل موج ولتاژ بار نداشته است. افت مقطعی ایجادشده در ولتاژ بار حدود ۱۵ ولت یعنی ۴/۸ درصد است که با توجه به استانداردهای کیفیت توان قابل قبول است.



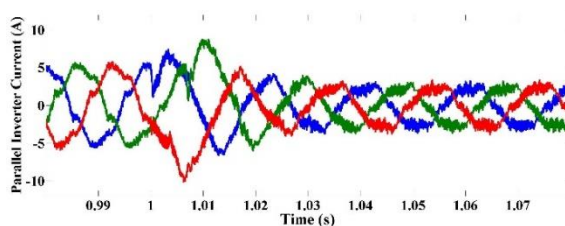
(ب)



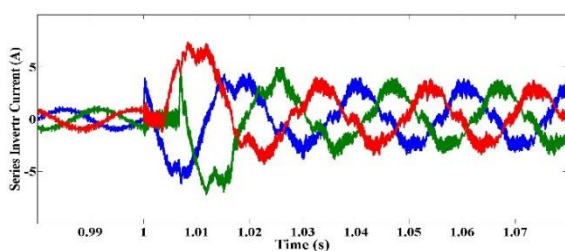
(پ)



(ت)



(ث)



(ج)

شکل ۱۷: الف) جریان اینورتر موازی در حالت قطع شبکه (بار کامل)،
 ب) جریان اینورتر سری در حالت قطع شبکه (بار کامل)، پ) جریان
 اینورتر موازی در حالت قطع شبکه (نیمه بار)، ت) جریان اینورتر سری
 در حالت قطع شبکه (نیمه بار)، ث) جریان اینورتر موازی در حالت
 قطع شبکه (بار کم)، ج) جریان اینورتر سری در حالت قطع شبکه (بار
 کم)

چنان که دیده می‌شود با قطع شبکه توان اکتیو و راکتیو بار به ترتیب تا حدود ۱۰ و ۱۵ درصد افت کرده و در کمتر از یک سیکل به مقدار پیشین خود بازمی‌گردد.

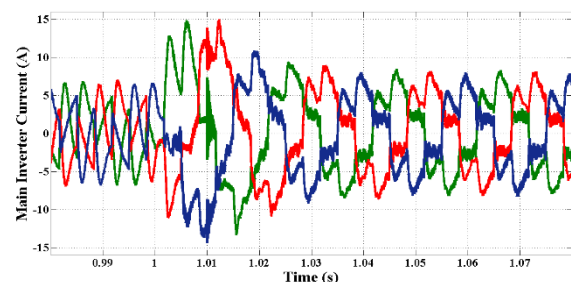
این مدت، زمانی است که کنترل کننده اینورتر موازی قادر به تأمین توان اکتیو و راکتیو بار می‌شود. پس از بسته شدن کلیدهای موازی کننده توان بار به تساوی بین دو اینورتر تقسیم می‌شود.

شکل ۱۷ به ترتیب جریان اینورتر موازی و اینورتر سری را برای هر یک از حالات بار کامل، نیمه بار و بار کم نشان می‌دهد. چنانکه در این شکل‌ها دیده می‌شود، جریان دو اینورتر پس از یک گذرای کوتاه مدت برابر می‌شود. که این نشان دهنده موفقیت الگوریتم کنترلی اینورتر سری، پس از موازی شدن دو مبدل است. از آنجا که کلیدهای موازی کننده دو اینورتر در گذر از صفر ولتاژ هر فاز بسته می‌شوند، فازهای اینورتر موازی به مدت کوتاهی جریانی بیش از نصف جریان بار را تحمل می‌کنند که برای آن‌ها قابل تحمل است.

شکل ۱۸ نیز به ترتیب توان اکتیو اینورترهای موازی و سری را برای هر سه حالت بار نشان می‌دهد. ابتدا و در فاصله زمانی بین قطع شبکه تا بسته شدن کلیدهای موازی کننده و موازی شدن دو اینورتر، برای مدت کوتاهی اینورتر موازی به تنهایی بار را تغذیه می‌کند. با موازی شدن دو اینورتر و فعال شدن کنترل کننده ارباب-برده تقسیم جریان، توان بار به تساوی بین دو اینورتر تقسیم می‌شود. این نتایج هم نشان دهنده موفقیت آمیز بودن تقسیم توان بین دو مبدل است.

شکل ۱۹ ولتاژ باس DC و جریان باتری را قبل و بعد از قطع شدن شبکه نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود قبل از قطع شبکه باتری در حال شارژ و نزدیک شدن به سطح مطلوب (۷۴۰ ولت) است و پس از قطع شبکه باتری برای تأمین توان مورد نیاز بار شروع به دشارژ می‌کند.

بنا به نتایج شبیه سازی انجام شده در این بخش، به هنگام قطع شبکه بار به خوبی و بدون مشکلی توسط UPS تغذیه می‌شود. دو اینورتر توان بار را میان خود تقسیم کرده اند؛ بنابراین UPS قادر به تغذیه باری تا دو برابر ظرفیت مبدل های خود است. در نتیجه با تغییر پیکربندی UPS از دوتبدیله به پیکربندی پیشنهادی بار به شکلی مناسبی تغذیه شده و بدون تحمیل هزینه قابل توجه ظرفیت UPS نیز تا دو برابر افزایش می‌یابد.



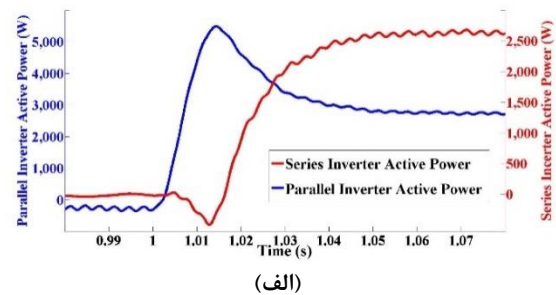
(الف)

۶- نتیجه گیری

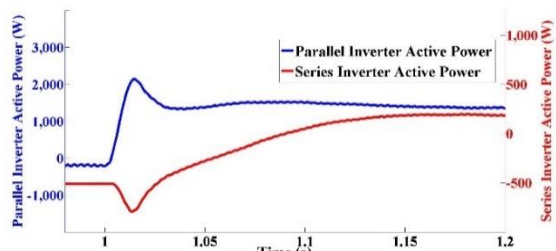
در این مقاله یک پیکربندی پیشنهادی برای افزایش ظرفیت UPS دوتبدیل تا دو برابر ظرفیت اولیه آن پیشنهاد شده است. در ضمن ساختاری برای تبدیل UPS دوتبدیل به این پیکربندی نیز ارائه شده است. در این پیکربندی در حالت تغذیه بار از شبکه، به علت افزایش توانایی جبران اختلالات شبکه و بار، اختلالات بار و شبکه روی یکدیگر اثر نخواهد داشت. در حالت ذخیره انرژی به کمک موازی سازی اینورترهای موجود، سامانه مورد نظر توانایی تغذیه باری تا ۲۰۰٪ توان نامی UPS دوتبدیل اولیه را خواهد داشت. شبیه سازی انجام شده نشان می دهد که این تغییر پیکربندی چه در حالت تغذیه بار از شبکه و چه در حالت تغذیه از باتری، روی عملکرد UPS تأثیری نداشته است.

مراجع

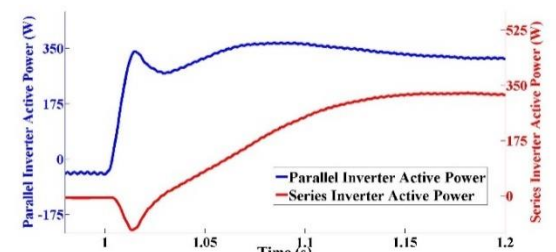
- [1] K. Shi, H. Li, C. Hu and D. Xu, "Topology of super uninterruptible power supply with Multiple Energy Sources", 9th International Conference On Power Electronics-ECCE Asia, 2015.
- [2] G. Carlos, C. Branco, M. Cícero, T. Cruz, René P. Torrico-Bascopé and F. L. M. Antunes, "A non-isolated single-phase UPS topology with 110-V/220-V input-output voltage ratings", *IEEE Trans. Ind. Electronics*, vol. 55, no. 8, pp. 2974-2983, 2008.
- [3] F. Botteron and H. Pinheiro, "A three-phase UPS that complies with the standard IEC 62040-3", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2120-2136, Aug. 2007.
- [4] A. Emadi, A. Nasiri and S. B. Bekiarov, *Uninterruptible Power Supplies and Active Filters* Boca Raton, FL: CRC Press, Oct. 2005.
- [5] M. Aamir, K.A. Kalwar and S. Mekhilef, "Review: uninterruptible power supply (UPS) systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1395-1410, 2016.
- [6] I. Ando, I. Takahashi, Y. Tanaka and M. Ikchara, "Development of a high efficiency UPS having active filter ability composed of a three arms bridge", *IECON 97*, 1997.
- [7] P. K. Dhal and C. Christober Asir Rajan, "Power quality improvement based on uninterruptible power supply (UPS) in distribution system", *IEEE SPONSORED 2nd International Conf. on Electronics and Communication System (ICECS)*, 2015.
- [8] S.B. Bekiarov and A. Emadi, "Uninterruptible power supplies: classification, operation, dynamics, and control" In *Proc. of the 17th IEEE Applied Power Electron. Conf., Dallas*, pp. 597-604, 2002.
- [9] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuna and J. Uceda, "Uninterruptible power supply systems provide protection," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 1, no. 1, pp. 28-38, 2007.
- [10] A. Nasiri, Z. Nie, S.B. Bekiarov and A. Emadi, "An on-line UPS system with power factor correction and electric isolation using BIFRED converter", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 2, pp. 722-730, 2008.
- [11] A. Fatemi, M. Azizi, M. Mohamadian and A. Yazdian, "Single-phase delta-conversion UPS with reduced components", 3rd PEDSTC Conf., 2012.
- [12] S. Rathmann and H.A. Warner, "New generation UPS technology, the delta conversion principle", *IAS 96*, 1996.
- [13] C. Liu, B. Wu, N. Zargari and D. Xu, "A novel nine-switch PWM rectifier-inverter topology for three phase UPS applications", *J. Europ. Power Electronics (EPE)*, vol. 19, no. 2, pp. 1-10, 2009.
- [14] J. K. Park, J. M. Kwon, E. H. Kim and B. H. Kwon, "High-performance transformerless online UPS", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 8, pp. 2943-2953, 2008.
- [15] S. B. Bekiarov, A. Nasiri and A. Emadi, "A new reduced parts on-line single-phase UPS system", *Industrial Electronics Society, IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*, vol. 1, pp. 688-693, 2003.



(الف)

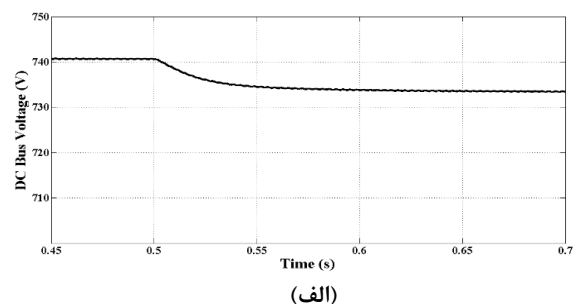


(ب)

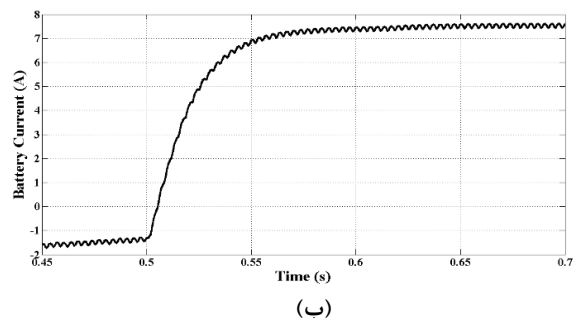


(پ)

شکل ۱۸: الف) توان اکتیو اینورتر موازی و سری هنگام قطع شبکه (بار کامل)، ب) توان اکتیو اینورتر موازی و سری هنگام قطع شبکه (نیمه بار)، پ) توان اکتیو اینورتر موازی و سری هنگام قطع شبکه (کم)



(الف)



(ب)

شکل ۱۹: الف) ولتاژ باس DC قبل و بعد از قطع شبکه ب) جریان باتری قبل و بعد از قطع شبکه