

اصلاح کیفیت توان شبکه‌های توزیع برق با بکارگیری طرح ترکیبی بهبودیافته DVR-PV مبتنی بر چا پر Interleave و مدولاسیون هیستریزس

حمید کریمی^۱، محسن سیماب^{۲*}، مهدی نفر^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، karimi.hamid@miau.ac.ir

۲* - استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، msimab@miau.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران، mnafar@miau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۲۵

چکیده: بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) یکی از تجهیزات جبران سازی ولتاژ می باشد. کیفیت ولتاژ تزریقی این تجهیز به کیفیت ولتاژ لینک DC و نوع مدولاسیون سیستم کنترل آن بستگی دارد. از آرایه فتوولتائیک می توان برای ذخیره ساز لینک DC این تجهیز استفاده نمود. برای افزایش ولتاژ خروجی آرایه فتوولتائیک به سطح ولتاژ DC مورد نیاز از یک چا پر بوست معمولی استفاده می گردد که به علت داشتن رایپل بالای ولتاژ، موجب کاهش کیفیت ولتاژ جبران ساز می گردد. استفاده از چا پرهایی با طرح مناسب نظیر Interleave، می تواند علاوه بر افزایش ولتاژ آرایه فتوولتائیک، رایپل ولتاژ لینک DC و در نتیجه محتوای هارمونیک ولتاژ تزریقی توسط جبران ساز را نیز کاهش دهد. همچنین بکارگیری مدولاسیون پهنای پالس مناسب در سیستم کنترل این تجهیز نیز می تواند در کاهش محتوای هارمونیک و بهبود کیفیت ولتاژ موثر باشد. در این مقاله، برای کاهش اعوجاج هارمونیک کل (THD) ولتاژ تزریقی جبران ساز و در نتیجه بهبود کیفیت ولتاژ بار، از مبدل بوست Interleave در لینک DC جبران ساز و از مدولاسیون هیستریزس در ساختار طرح کنترلی این جبران ساز ترکیبی استفاده می شود و نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم پیشنهادی با نتایج حاصل از جبران ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست معمولی و مدولاسیون سینوسی مقایسه می شود. شبیه سازی ها با بهره گیری از نرم افزار Matlab/Simulink انجام می شود.

واژه های کلیدی: کیفیت توان، آرایه فتوولتائیک (PV)، مبدل Interleave، مدولاسیون هیستریزس، بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR)

۱- مقدمه

انرژی لینک DC آن بستگی دارد. در شرایط وقوع افت ولتاژ شدید در منبع تغذیه، در صورت عدم وجود منبع ذخیره ساز انرژی در لینک DC، این تجهیز قادر به بازیابی و اصلاح کامل ولتاژ نمی باشد. بنابراین، بکارگیری منابع ذخیره ساز انرژی نظیر باتری یا منابع انرژی نو برای این جبران ساز ضروری است [۱۲-۱۳]. در [۱۴-۱۸]، ساختار آرایه فتوولتائیک^۳ (PV) و مدار معادل و روابط و معادلات ریاضی آن و در [۱۹-۲۲]، ساختار مبدل DC-DC مرسوم مورد استفاده در خروجی PV، معرفی شده است. این مبدل که شامل سلف ها، دیودها و خازن ها بوده، مبدل بوستی است که برای افزایش ولتاژ خروجی PV

ادوات D-FACTS و یا Custom Power به عنوان ادوات مناسبی جهت اصلاح کیفیت توان سیستم های توزیع برق معرفی شده اند که توپولوژی و ساختار تعدادی از این تجهیزات در [۱-۵] ارائه شده است. یک نوع از این ادوات که برای بازیابی ولتاژ و اصلاح کمبود ولتاژ^۱ در سیستم های توزیع بکار می رود، بازیاب دینامیکی ولتاژ^۲ (DVR) می باشد. مولفه ها و اجزای این جبران ساز در [۵-۱۱] معرفی شده است. قابلیت این تجهیز در جبران سازی کمبود ولتاژ، به ظرفیت ذخیره ساز

اجزای این تجهیز شامل خازن لینک DC، اینورتر یا مبدل منبع ولتاژ^۵ (VSC)، فیلتر پسیو، سوئیچ بای پاس، سیستم کنترل، ترانسفورمرهای تزریق سری و واحد ذخیره ساز انرژی می باشد [۵-۱۰].

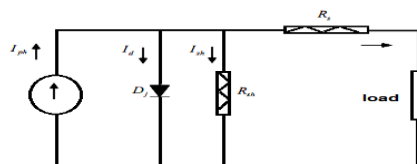
خازن DC موجب ثابت نگه داشتن ولتاژ DC ورودی به اینورتر می باشد. وظیفه اصلی اینورتر، تبدیل ولتاژ DC تامین شده به وسیله منبع ذخیره انرژی به ولتاژ AC می باشد. سوئیچ بای پاس برای حفاظت از اینورتر DVR در مواقعی که خطا در سمت پایین دست رخ می دهد استفاده می شود. فیلترهای پسیو برای حذف مولفه های هارمونیک فرکانس بالا و تبدیل شکل موج AC خروجی اینورتر به شکل موج سینوسی استفاده می گردند و برای افزایش سطح ولتاژ تولیدی توسط DVR از ترانسفورمرهای تزریق سری استفاده می شود.

واحد ذخیره ساز انرژی وظیفه ذخیره انرژی DC را دارد و توان مورد نیاز برای جبران سازی را تامین می کند. در صورت عدم وجود منبع انرژی در لینک DC، این تجهیز نمی تواند کمبود ولتاژهای شدید را جبران سازی کند. آرایه فتوولتائیک می تواند برای تامین یک منبع DC مورد نیاز DVR بکار رود. با توجه به نوسانی بودن و همچنین پایین بودن ولتاژ خروجی سلول فتوولتائیک و با توجه به اینکه در افت ولتاژهای شدید نیاز به وجود ولتاژ لینک DC جهت جبران سازی ولتاژ بار می باشد لذا وجود این مبدل افزایشده به طوریکه ولتاژ لینک DC را در حد نامی نگه دارد ضروری است. در اینجا با توجه به موثری مبدل Interleave در ایجاد ولتاژ DC خروجی با رایبل ناچیز از این مبدل استفاده می شود.

به منظور در دسترس بودن انرژی مورد نیاز لینک DC در DVR در طی شب و همچنین در شرایط هوای ابری، می توان از یک منبع انرژی ذخیره پشتیبان نظیر باتری بصورت موازی با مجموعه آرایه فتوولتائیک و مبدل آن نیز استفاده نمود.

۳- مدل سلول فتوولتائیک (PV)

سلول فتوولتائیک در اصل یک دیود پیوندی p-n است که مدار معادل مدل تک-دیودی آن در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۵-۱۸].



شکل (۲): مدار معادل مداری یک سلول خورشیدی [۱۸]

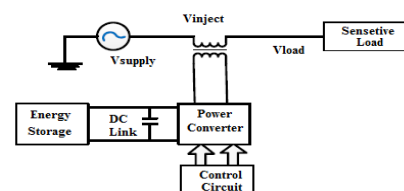
D_j دیود p-n ایده آل است، I_{ph} به عنوان منبع جریان نوری (فتو) تولید شده متناسب با دمای سطح و تابش بیان می شود. V و I به ترتیب، ولتاژ و جریان خروجی سلول خورشیدی است. R_s مقاومت سری خیلی کوچکی و R_{sh} یک مقاومت موازی بزرگ است. بر طبق ویژگی فیزیکی نیمه هادی p-n، مشخصه های I-V ماژول PV می تواند به صورت رابطه زیر بیان شود [۱۸].

می شود. اگرچه عموماً از این مبدل برای افزایش ولتاژ خروجی PV استفاده می شود ولی ولتاژ خروجی آن دارای رایبل و نوسان بوده که در صورت بکارگیری در لینک DC جبران ساز، ولتاژ تزریقی توسط جبران ساز معوج و هارمونیک بوده و همچنین جبران ساز نمی تواند به طور کامل و دقیق، ولتاژ از دست رفته را بازیابی نماید. استفاده از مبدل های DC-DC یا چار با ساختار مناسب نظیر ساختار Interleave در سیستم های PV، می تواند بازدهی این سیستم ها را افزایش داده و ضمن افزایش ولتاژ آرایه فتوولتائیک به سطح مناسب، رایبل ولتاژ خروجی DC و محتوای هارمونیک ولتاژ تزریقی توسط جبران ساز را نیز کاهش دهد. در [۲۳-۲۶]، چندین توپولوژی مختلف از این مبدل ها ارائه شده است.

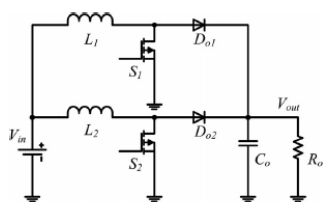
علاوه بر موضوع ذخیره ساز، عملکرد این جبران ساز در اصلاح کمبود ولتاژ و کیفیت ولتاژ تزریقی به نوع مدولاسیون پهنای پالس مورد استفاده در سیستم کنترل آن وابسته است. برای تولید سیگنال های کلیدزنی مبدل منبع ولتاژ (VSC) در DVR عموماً از مدولاسیون های مختلفی نظیر مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) و مدولاسیون هیستریزس استفاده می شود [۲۷-۳۲]. استفاده از مدولاسیون هیستریزس به علت پیاده سازی ساده و پاسخ سریع گزینه مناسبتری نسبت به SPWM می باشد. در این مقاله، با اتصال طرح پیشنهادی به یک شبکه توزیع نمونه، عملکرد آن در بازیابی ولتاژ بار حساس به ولتاژ و در نتیجه بهبود کیفیت توان بررسی و آنالیز می شود و اثبات می شود که طرح پیشنهادی علاوه بر بازیابی دقیق ولتاژ بار، محتوای هارمونیک کمتری به شبکه تزریق می کند و در نتیجه ضمن بهبود کیفیت ولتاژ تزریقی، بهبود بیشتر کیفیت توان مصرف کننده را در بر خواهد داشت.

۲- ساختار بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR)

بازیاب دینامیکی ولتاژ یکی از تجهیزات بهبود کیفیت توان است که برای محافظت بار و جلوگیری از رسیدن اغتشاشات منبع به بارهای حساس استفاده می شود. پس از اتصال DVR به شبکه، کمبود ولتاژ ناشی از هر خطایی به سرعت اصلاح شده و باعث جلوگیری از اختلال عملکرد بارهای حساس به نوسان ولتاژ می گردد. این تجهیز در هنگام بروز خطا، ولتاژی به اندازه اختلاف بین ولتاژ پیش از خطا و ولتاژ حین خطا به وسیله تامین توان اکتیو مورد نیاز از منبع ذخیره انرژی DC و توان راکتیو با هم تزریق می کند و ولتاژ سمت بار را در محدوده نامی و در مقدار قبل از خطا حفظ می نماید [۵]. توپولوژی کلی DVR در شکل (۱) نشان داده شده است [۵].



شکل (۱): توپولوژی کلی DVR [۵]



شکل (۴): شماتیک مبدل بوست Interleave (IBC) [۲۶]

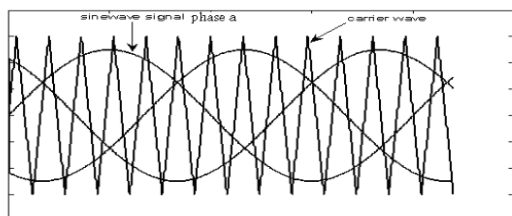
۵- مدولاسیون‌های پهنای پالس سینوسی و

مدولاسیون هیستریزیس

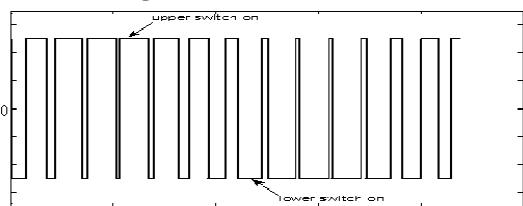
دو نوع از مدولاسیون‌های مورد استفاده برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی مبدل منبع ولتاژ (VSC) در DVR، مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) و مدولاسیون هیستریزیس می‌باشند که در ادامه، به طور اجمالی نحوه عملکرد این دو مدولاسیون ارائه می‌شود.

۵-۱- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی

در مدولاسیون پهنای پالس سینوسی سه‌فاز، برای تولید سیگنال‌های PWM، سیگنال‌های مدوله‌کننده مرجع سه‌فاز، با یک موج مثلثی مقایسه می‌شوند و از تقاطع هر موج سینوسی با موج مثلثی ولتاژهای فاز بدست می‌آیند [۲۷]. سیگنال حامل می‌تواند موج دندان اره‌ای باشد. شکل‌های (۵) و (۶) اساس عملکرد مدولاسیون پهنای پالس سینوسی را نشان می‌دهند [۲۷].



شکل (۵): مدولاسیون پهنای پالس سینوسی سه‌فاز [۲۷]



شکل (۶): پالس بدست آمده از مدولاسیون پهنای پالس سینوسی [۲۷]

ولتاژ خروجی اینورتر به‌صورت رابطه (۴) تعیین می‌شود:

$$V_{control} > V_{tri} \Rightarrow V_{A0} = V_{dc}/2 \quad (4)$$

$$V_{control} < V_{tri} \Rightarrow V_{A0} = -V_{dc}/2$$

که $V_{control}$ پیک ولتاژ موج سینوسی یا مرجع و V_{tri} پیک ولتاژ موج حامل (مثلثی) و V_{dc} ولتاژ لینک DC می‌باشد.

۵-۲- مدولاسیون هیستریزیس

تکنیک کنترل ولتاژ هیستریزیس^۷ یک نوع کنترلر ولتاژ غیرخطی مبتنی بر خطای ولتاژ می‌باشد. شکل (۷)، کنترلر ولتاژ هیستریزیس

$$I(1 + R_s / R_{sh}) = n_p I_{ph} - n_p I_{sat} [\exp \{ (q / AkT)(V / n_s + IR_s) \} - 1] - (V - n_s) / R_{sh} \quad (1)$$

در این رابطه، q بار الکترون (1.602×10^{-19} C) و k ثابت بولتزمن (1.38×10^{-23} J/K)، T دمای سطح مازول PV است و A نشانگر ضریب ایده‌آل پذیری ($A=1-5$) است که در بعضی از منابع به‌جای آن α معرفی شده است. n_s تعداد سلول‌های متصل شده به‌صورت سری و n_p تعداد سلول‌های متصل شده به‌صورت موازی می‌باشد. علاوه‌براین، جریان اشباع معکوس I_{sat} که رابطه آن در زیر ذکر شده، با دمای T تغییر می‌کند [۱۸].

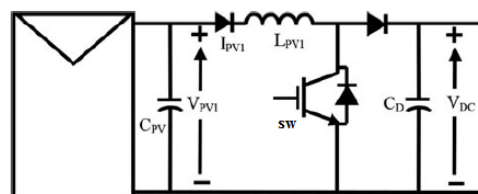
$$I_{sat} = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left\{ \frac{qE_{gap}}{kA} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right\} \quad (2)$$

E_{gap} انرژی فاصله باند برای سیلیکون ($E_{gap} \approx 1.1$ eV) است و T_r دمای مرجع سلول خورشیدی است. I_{ph} بیان شده در رابطه زیر جریان فوتو متناسب تولید شده برای میزان دمای سطح سلول و تابش است که I_{ss0} جریان اتصال کوتاه، k_i ضریب دمای جریان اتصال کوتاه و S_i تابش خورشید برحسب W/m^2 می‌باشد [۱۸].

$$I_{ph} = \{ I_{ss0} + k_i (T - T_r) \} \frac{S_i}{1000} \quad (3)$$

۴- ساختار چارپر بوست معمولی و Interleave

استفاده از یک مبدل DC-DC بوست یا چارپر جهت افزایش ولتاژ خروجی سلول فتوولتائیک با توجه به ماهیت نوسانی بودن ولتاژ خروجی سلول فتوولتائیک در اثر تغییرات سطح تابش و دمای محیط، ضروری است [۱۹-۲۲]. ساختار چارپر مرسوم مورد استفاده برای آرایه‌های فتوولتائیک در شکل (۳) نشان شده است [۲۱].



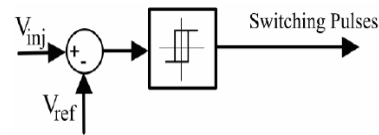
شکل (۳): ساختار مبدل DC-DC مرسوم بکار رفته در خروجی PV [۲۱]

یکی از مشکلات عمده این نوع مبدل این است که ولتاژ خروجی آنها معمولاً دارای سطح رایپل بالا می‌باشد و بنابراین لازم است که از مبدل‌های مناسبتری استفاده شود.

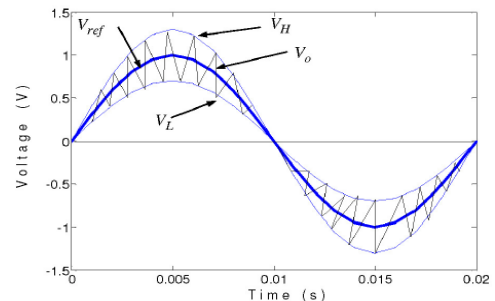
مبدل بوست Interleave (IBC)^۸ که ساختار آنها در [۲۳-۲۶] ارائه شده دارای رایپل جریان ورودی و رایپل کم ولتاژ خروجی است [۲۶]. ساختار مبدل بوست Interleave در شکل (۴) نشان داده شده است [۲۶].

مبدل بوست Interleave شامل سلف‌های اصلی L_1 و L_2 ، سوئیچ‌های اصلی S_1 و S_2 ، خازن C_0 و دیودهای خروجی D_{01} و D_{02} است. جزئیات بیشتر در مورد این مبدل و مدار معادل این مبدل در مراحل کاری مختلف در [۲۶] ارائه شده است.

و شکل (۸)، اساس کار این کنترلر را نشان می‌دهد [۳۱-۳۲].



شکل (۷): کنترلر ولتاژ هیستریزس [۳۱]



شکل (۸): اساس کار کنترل ولتاژ هیستریزس [۳۲]

این کنترلر شامل مقایسه بین ولتاژ خروجی V_0 و حدود تیرانس (V_H) و V_L) حول ولتاژ مرجع V_{ref} می‌باشد. مادامی‌که ولتاژ خروجی V_0 بین حد بالایی V_H و حد پایینی V_L می‌باشد هیچ‌گونه کلیدزنی انجام نمی‌شود و هنگامی‌که ولتاژ خروجی از حد بالایی عبور می‌کند ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد و هنگامی‌که ولتاژ خروجی از حد پایینی عبور می‌کند ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد [۳۲].

به منظور تولید پالس‌های کلیدزنی سوئیچ‌های مبدل منبع ولتاژ در DVR، سیگنال‌های ولتاژ سه فاز مرجع تولید شده با ولتاژهای خروجی سه فاز DVR مقایسه می‌شوند. در کنترل هیستریزیس هر فاز به‌طور مستقل کنترل می‌شود [۳۲].

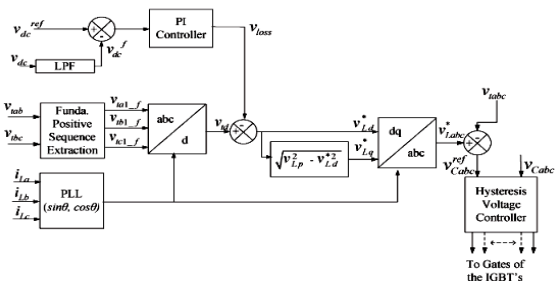
استفاده از این مدولاسیون در سیستم کنترل جبران‌ساز می‌تواند منجر به بازیابی ولتاژ بار با اعوجاج هارمونیکی کل کمتری گردد.

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h}}{V_1} \times 100\% \quad (\Delta)$$

که در این رابطه، V_1 مولفه اصلی ولتاژ و V_h مولفه‌های هارمونیک ولتاژ می‌باشند.

۶- طرح کنترل

سیستم کنترل وظیفه تشخیص خطا، محاسبه و تعیین مقدار ولتاژ مورد نیاز برای جبرانسازی و تولید پالس‌های تریگر برای مبدل و تزریق ولتاژ را دارد. در حالتی که ولتاژ منبع تغذیه در محدوده نرمال قرار دارد، DVR به گونه‌ای کنترل می‌شود که تلفات در آن به حداقل برسد. وقتی کمبود ولتاژ رخ می‌دهد لازم است DVR در سریعترین زمان ممکن واکنش نشان داده و یک ولتاژ AC را به شبکه تزریق نماید[۳۳].



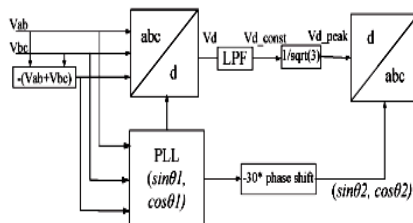
شکل (۹): دیاگرام کلی سیستم کنترل SRFT [۳۴]

یک ولتاژ سه فاز مرجع برای اینورتر PWM توسط الگوریتم کنترل تولید می‌شود. ولتاژ مورد نیاز توسط اینورتر تزریق می‌شود به گونه‌ای که ولتاژ بار در سطح مرجع آن نگه دارد.

از حلقه قفل فاز $^{(1)}$ PLL و تبدیل dqo یا تبدیل پارک برای کنترل جبران‌ساز استفاده می‌شود.

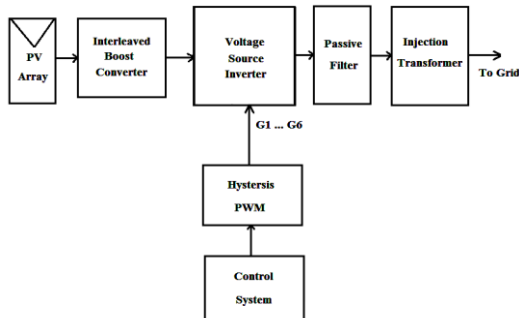
در مرحله اول، ولتاژ از قاب مرجع $a-b-c$ به مرجع $d-q-o$ تبدیل می-شود. مدار PLL برای تولید یک موج سینوسی واحد هم‌فاز با ولتاژهای اصلی استفاده می‌شود. در حقیقت زاویه θ گردان بین محورهای d و q توسط PLL ایجاد می‌شود و در هر لحظه زاویه فاز را برای تولید ولتاژی هم‌فاز با سیستم قدرت توسط کنورتر به سیستم کنترل می-دهد.

در این طرح، از دو ولتاژ خط برای استخراج مولفه اصلی ولتاژهای توالی مثبت استفاده می‌شود همچنان‌که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): استخراج توالی مثبت مولفه اصلی [۳۴]

در شکل (۱۱)، بلوک دیاگرام کلی طرح ترکیبی بهبود یافته DVR-PV مبتنی بر چایر Interleave و مدولاسیون هیستریزس ارائه شده است.



شکل (۱۱): بلوک دیاگرام کلی طرح ترکیبی بهبود یافته DVR-PV مبتنی بر چایر Interleave و مدولاسیون همسترزس

جدول (۱): پارامترها و مشخصات سلول فتوولتاییک [۱۴]

پارامتر	علامت اختصاری	مقدار
بار الکترون	e	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
ثابت بولتزمن	K	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
جریان فوتو	I_{ph}	5 A
جریان اشباع معکوس دیود	I_0	2e-4 A
مقاومت سری سلول	R_s	0.001 Ω
دمای کاری مرجع سلول	T_c	20 C
ولتاژ خروجی آرایه	V	160 V

جدول (۲): پارامترها و مشخصات مبدل Interleave DC-DC [۲۶]

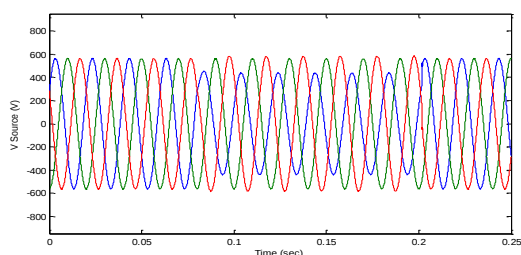
پارامتر	علامت اختصاری	مقدار
اندوکتانس سلف اولیه	L1	15 μH
اندوکتانس سلف ثانویه	L2	15 μH
اندوکتانس تزویج	M	14.78 μH
ولتاژ ورودی	V_{pv}	160 V
ولتاژ خروجی	V_{out}	500 V
فرکانس سوئیچینگ	f_{sw}	3 kHz
خازن خروجی مبدل	C_o	100 μF

جدول (۳): مشخصات و مقادیر اجزای مختلف DVR

مشخصات	اجزای DVR
ظرفیت منبع DC	500 V
نوع ترانس تزریق	سه ترانس تک فاز
راکتانس نشی ترانس تزریق (%uk)	uk=10%
نوع سوئیچهای قدرت VSI	IGBT
فرکانس کلیدزنی	3000 Hz
نوع اینورتر	اینورتر پل سه فاز ۲ سطحه
فیلتر پسیو	0.005 اهم و ۵ میلی هانری

۷-۱- سناریوی یک: وقوع خطای تک فاز به زمین و بررسی کارایی جبران ساز پیشنهادی

در این سناریو، در سمت منبع تغذیه، یک خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین در بازه زمانی ۸۰ میلی ثانیه تا ۲۰۰ میلی ثانیه رخ می دهد و ولتاژ یک فاز حدود ۱۰٪ افت می کند. نتایج شبیه سازی حاصل از این سناریو در شکل های (۱۳) الی (۱۹) نشان داده شده اند.



شکل (۱۳): ولتاژ سمت منبع در حالت وقوع کمبود ولتاژ ناشی از خطای اتصال کوتاه تک فاز به زمین

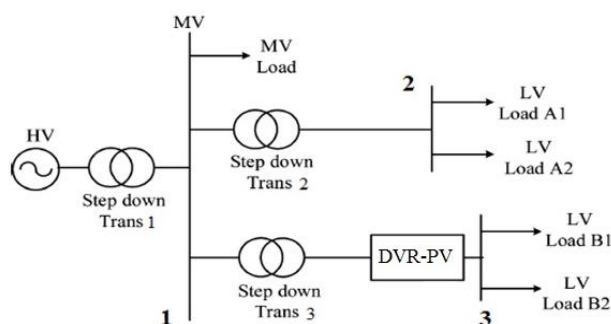
در طرح پیشنهادی، به منظور دستیابی به ولتاژ DC تقریباً ایده آل با حداقل رایپل و با دامنه مطلوب و تأمین انرژی مورد نیاز لینک DC بازیاب دینامیکی ولتاژ، از چار Interleave استفاده شده است. نتیجه حاصل از بکارگیری این طرح، بهبود کیفیت ولتاژ تزریقی توسط جبران ساز و بهبود ولتاژ بازیابی شده بار می باشد.

همچنین، برای تولید پالس های کلیدزنی اینورتر جبران ساز ترکیبی، از مدولاسیون هیستریزس به جای مدولاسیون سینوسی مرسوم استفاده شده که ضمن پیاده سازی ساده و داشتن پاسخ سریع نسبت به مدولاسیون سینوسی، منجر به کاهش بیشتر اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ تزریقی و در نتیجه بهبود بیشتر کیفیت ولتاژ اصلاح شده بار می گردد.

در بخش بعد، عملکرد طرح پیشنهادی در بازیابی ولتاژ بارهای حساس شبیه سازی شده و نتایج حاصل از شبیه سازی ها ارائه و آنالیز می گردد.

۷- شبیه سازی و نتایج

در این بخش، یک شبکه توزیع برق نمونه با حضور طرح پیشنهادی، با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب شبیه سازی گردیده و عملکرد آن جهت اصلاح کمبود ولتاژهای ناشی از خطاهای اتصال کوتاه متعادل و نامتعادل بررسی و تحلیل می شود و نتایج شبیه سازی ارائه می گردد. دیاگرام تک خطی شبکه برق نمونه با حضور طرح ترکیبی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): شبکه برق نمونه مورد مطالعه [۳۶]

در شبیه سازی ها، شبکه بالادست با استفاده از مدار معادل تونن با ولتاژ 20kV و فرکانس 50Hz معادل شده است (شبکه بالادست شین ۱). بارهای فشار متوسط و ترانسفورماتورهای توزیع از طریق شین ۱ تغذیه می شوند. بارهای LV از طریق دو ترانسفورماتور کاهنده 20/0.4 kV تغذیه می شوند (شین ۲ و ۳).

پارامترها و مشخصات مورد استفاده در شبیه سازی، در جدول (۱) الی (۳) لیست شده اند. پارامترهای مدل سلول فتوولتاییک از [۱۴] و پارامترهای مربوط به المان های اصلی مبدل DC از [۲۶] اتخاذ شده است و پارامترهای بازیاب دینامیکی ولتاژ متناسب با ولتاژ و توان مورد نیاز بارهای حساس شبکه مورد مطالعه انتخاب شده است به طوری که قادر به اصلاح افت ولتاژهای شدید متعادل و نامتعادل باشد.

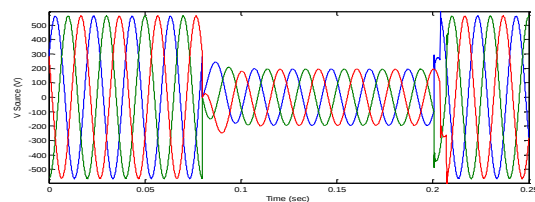
در اثر خطای تک‌فاز به زمین ولتاژ یک فاز از بارهای شین 400V (شین ۲ و ۳) به میزان ۱۰٪ افت می‌کند که این میزان افت ولتاژ سریعاً توسط DVR جبران می‌گردد. در این حالت برای اصلاح ولتاژ، DVR به میزان لازم توان به سیستم تزریق می‌کند. به علت سوئیچ‌زنی ادوات الکترونیک قدرت در DVR، محتوای شکل موج تزریقی جبران‌ساز سینوسی خالص نبوده و مقداری هارمونیک به شبکه تزریق می‌شود که باعث افزایش درصد THD شبکه می‌گردد.

در اینجا برای کاهش اعوجاج هارمونیک کل (THD) شکل موج ولتاژ تزریقی جبران‌ساز و در نتیجه بهبود کیفیت ولتاژ اصلاح شده سمت بار، از مبدل بوست Interleave در لینک DC جبران‌ساز و از مدولاسیون هیستریزس در ساختار طرح کنترلی آن استفاده شده است و نتایج حاصله با مبدل بوست معمولی و مدولاسیون سینوسی مقایسه شده است.

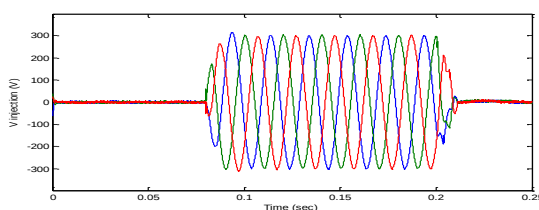
از طیفهای فرکانسی بدست آمده می‌توان مشاهده نمود که درصد THD ولتاژ اصلاح شده سمت بار در حالت استفاده از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست معمولی و مدولاسیون سینوسی، ۳٫۹۱٪ بوده و در حالت استفاده از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست Interleave و مدولاسیون سینوسی، مقدار THD ولتاژ اصلاح شده سمت بار به ۲٫۱۶٪ کاهش می‌یابد و در شرایطی که از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست Interleave و مدولاسیون هیستریزس استفاده می‌شود مقدار THD به ۱٫۶۳٪ کاهش می‌یابد و بنابراین کیفیت ولتاژ سمت بار در شرایط مطلوبتری می‌باشد.

۷-۲- سناریوی دو: وقوع خطای سه‌فاز به زمین و بررسی کارایی جبران‌ساز پیشنهادی

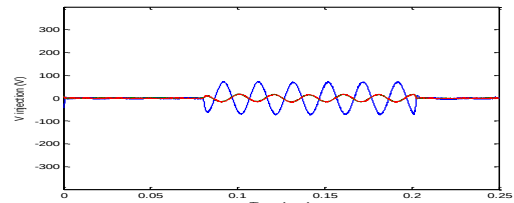
در این سناریو، در سمت منبع تغذیه، یک خطای اتصال کوتاه سه‌فاز به زمین در همان بازه زمانی رخ می‌دهد که در اثر آن، ولتاژ سمت منبع تغذیه حدود ۷۰٪ افت می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۲۰) الی (۲۵) نشان داده شده‌اند.



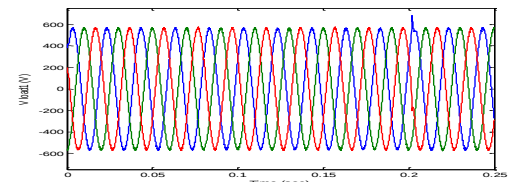
شکل (۲۰): ولتاژ سمت منبع در حالت وقوع کمبود ولتاژ ناشی از خطای اتصال کوتاه سه‌فاز به زمین



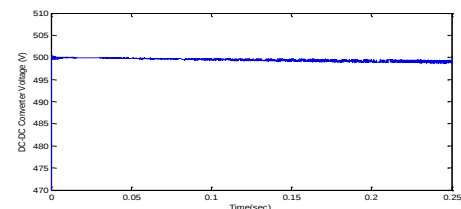
شکل (۲۱): ولتاژ تزریقی توسط جبران‌ساز در حالت وقوع کمبود ولتاژ ناشی از خطای اتصال کوتاه سه‌فاز به زمین



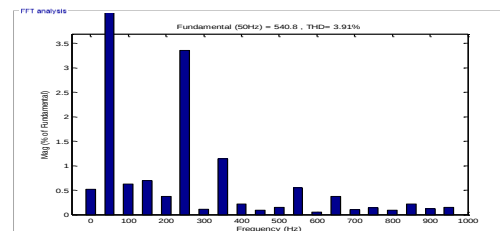
شکل (۱۴): ولتاژ تزریقی توسط جبران‌ساز در حالت وقوع کمبود ولتاژ ناشی از خطای اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین



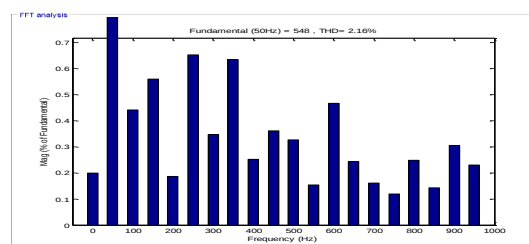
شکل (۱۵): ولتاژ سمت بار (شین ۳) در حالت وقوع کمبود ولتاژ ناشی از خطای اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین



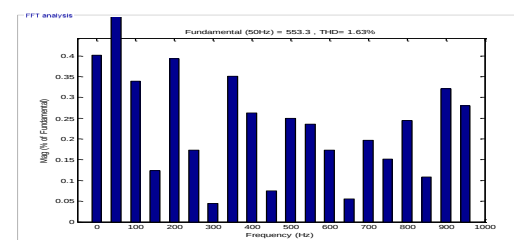
شکل (۱۶): ولتاژ لینک DC و خروجی مبدل DC-DC



شکل (۱۷): طیف فرکانسی ولتاژ اصلاح شده سمت بار در حالت استفاده از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست معمولی و مدولاسیون سینوسی



شکل (۱۸): طیف فرکانسی ولتاژ اصلاح شده سمت بار در حالت استفاده از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست Interleave و مدولاسیون سینوسی



شکل (۱۹): طیف فرکانسی ولتاژ سمت بار در حالت استفاده از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست Interleave و مدولاسیون هیستریزس

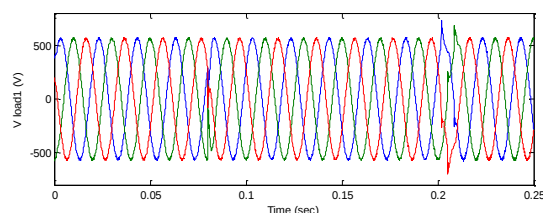
در حالت بکارگیری مبدل بوست Interleave نسبت به در حالت بکارگیری مبدل بوست معمولی کمتر می‌باشد و در شرایطی که از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست Interleave و مدولاسیون هیستریز استفاده می‌شود ولتاژ بار دارای وضعیت ایده‌آل‌تری بوده و تقریباً به شکل سینوسی متعادل و دارای حداقل محتوای هارمونیک بوده و همانگونه که از نتایج مشهود است اعوجاج هارمونیک کل (THD) ولتاژ اصلاح شده بار، بسیار پایین می‌باشد. در جدول (۴)، درصد THD ولتاژ بار در حالت بکارگیری هر یک از انواع مدولاسیون‌ها و مبدل‌های DC-DC مورد بحث، لیست شده است.

جدول (۴): مقایسه درصد اعوجاج هارمونیک کل (THD) ولتاژ بار با بکارگیری مبدل‌ها و مدولاسیون‌های مختلف

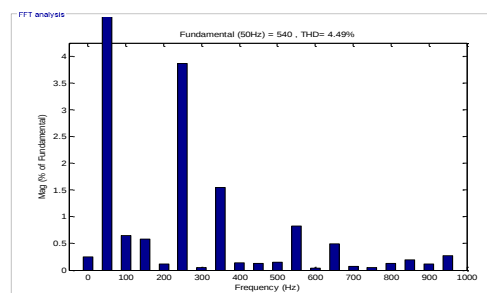
نوع مبدل DC-DC و نوع مدولاسیون مورد استفاده			نوع خطای اتصال کوتاه
مبدل بوست و هیستریز	مبدل بوست Interleave و مدولاسیون سینوسی	مبدل بوست معمولی و مدولاسیون سینوسی	
1.63%	2.16%	3.91%	خطای اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین
1.73%	2.83%	4.49%	خطای اتصال کوتاه سه‌فاز به زمین

۸- نتیجه گیری

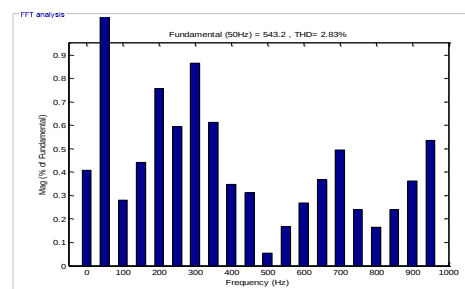
در این مقاله، طرح جبران‌ساز ترکیبی بازیابی دینامیکی ولتاژ مبتنی بر PV و مبدل Interleave برای جبران‌سازی و اصلاح کمبود ولتاژ ارائه گردید. این ساختار ترکیبی می‌تواند نوسانات ولتاژ طولانی مدت را جبران‌سازی نماید. برای کاهش اعوجاج هارمونیک کل (THD) ولتاژ تزریقی جبران‌ساز و در نتیجه بهبود کیفیت ولتاژ اصلاح شده بار از مبدل بوست Interleave در لینک DC جبران‌ساز و از مدولاسیون هیستریز در ساختار طرح کنترلی این جبران‌ساز استفاده گردید و نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی با نتایج حاصل از جبران‌ساز مبتنی بر مبدل بوست معمولی و مدولاسیون سینوسی مقایسه گردید. طرح پیشنهادی هم‌قادر به بازیابی و اصلاح ولتاژهای ناشی از خطاهای متقارن و هم‌قادر به بازیابی و اصلاح کمبود ولتاژهای ناشی از خطاهای نامتقارن می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیستم پیشنهادی می‌تواند بطور موثری قابلیت جبران‌سازی طرح ترکیبی DVR-PV را افزایش دهد. بنابراین، بکارگیری روش پیشنهادی باعث بهبود عملکرد بازیابی دینامیکی ولتاژ شده و قابلیت این تجهیز در جبران‌سازی و بهبود کیفیت ولتاژ بارهای حساس در شرایط وقوع کمبود ولتاژها را بهبود می‌بخشد.



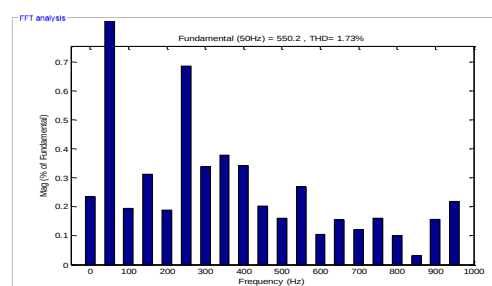
شکل (۲۲): ولتاژ سمت بار (شین ۳) در حالت وقوع کمبود ولتاژ ناشی از خطای اتصال کوتاه سه‌فاز به زمین



شکل (۲۳): طیف فرکانسی ولتاژ اصلاح شده بار در حالت استفاده از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست معمولی و مدولاسیون سینوسی



شکل (۲۴): طیف فرکانسی ولتاژ اصلاح شده بار در حالت استفاده از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست Interleave و مدولاسیون سینوسی



شکل (۲۵): طیف فرکانسی ولتاژ اصلاح شده بار در حالت استفاده از جبران‌ساز ترکیبی مبتنی بر مبدل بوست Interleave و مدولاسیون هیستریز

علی‌رغم وجود کمبود ولتاژ در سمت منبع، ولتاژ لینک DC توسط PV و مبدل DC-DC بوست Interleave ثابت نگه داشته می‌شود تا DVR بتواند کمبود ولتاژهای با زمان‌های طولانی مدت را نیز به راحتی جبران‌سازی و اصلاح نماید. زمانی که کمبود ولتاژی اتفاق می‌افتد با بکارگیری طرح پیشنهادی و تزریق ولتاژ با اندازه مطلوب، ولتاژ سمت بار در محدوده نرمال بازیابی می‌شود. همانگونه که از شکل موج بار و محتوای طیف فرکانسی مشاهده می‌شود درصد اعوجاج هارمونیک کل

مراجع

- Using PI Controller", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 36, pp. 51-59, 2012.
- [14] Altas, I. H., Sharaf, A. M., "Photovoltaic array simulation model for Matlab-Simulink GUI environment" *International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, Italy, pp. 341 - 345, 21-23, 2007.
- [15] Liu, X., Wang, P., and Chiang Loh, P., "A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 2, No. 2, 2011.
- [16] Mousazadeh Mousavi, S. Y., Jalilian, A. R., Savaghebi, M., Guerrero, J. M., "Power quality enhancement and power management of a multifunctional interfacing inverter for PV and battery energy storage system" *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 28, Issue 12, e2643, 2018.
- [17] Besheer, A. H., Kassem, A. M., Abdelaziz, A. Y., "Single-diode Model Based Photovoltaic Module: Analysis and Comparison Approach", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 42, No. 12, pp. 1289-1300, 2014.
- [18] Kuei-Hsiang, Ch., Ching-Ju, L., Sheng-Han, H., "Modeling and fault simulation of photovoltaic generation systems using circuit-based model", 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, pp. 290-294, 2008.
- [19] Mary, S. S., Kumar, S. S., Poluru, S. P., Bharata Reddy, M. J., "A Dual DC Output Power Supply for a Stand-alone Photovoltaic System," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 43, Nos. 8-10, pp. 939-950, 2015.
- [20] Datta, M., Senjyu, T., Yona, A., Funabashi, T., "Photovoltaic Output Power Fluctuations Smoothing by Selecting Optimal Capacity of Battery for a Photovoltaic-Diesel Hybrid System," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 39, No. 7, pp. 621-644, 2011.
- [21] Ameer, K., Hadjaissa, A., Cheknane, A., Essounbouli, N., "DC-Bus Voltage Control Based on Power Flow Management Using Direct Sliding Mode Control for Standalone Photovoltaic Systems," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 45, No. 10, pp. 1106-1117, 2017.
- [22] Kamatchi Kannan, V., Rengarajan, N., "Photovoltaic Based Distribution Static Compensator for Power Quality Improvement", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 42, pp. 685-692, 2012.
- [23] Samavatian, V., Radan, A., "A novel low-ripple Interleaved buck-boost converter with high efficiency and low oscillation for fuel-cell applications", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 63, pp. 446-454, 2014.
- [24] Mirbagheri, S. Z., Mekhilef, S., Mirhassani S. M., "MPPT with Inc. Cond method using conventional Interleaved boost converter", *Mediterranean Green Energy Forum (MGEF-13)*, *Energy Procedia*, 42, 24 - 32, 2013.
- [25] Saudi Samosir, A., Taufiq, Shafie, A. J., Mohd Yatim, A. H., "Simulation and Implementation of Interleaved Boost DC-DC Converter for Fuel Cell Application", *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Vol. 1, No. 2, pp. 168-174, December 2011.
- [26] Gu, Y., Zhang, D., "Interleaved Boost Converter with Ripple Cancellation Network", *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 28, No. 8, August 2013.
- [1] Rohani, A., Joorabian, M., Abasi, M., Zand, M., "Three-phase amplitude adaptive notch filter control design of DSTATCOM under unbalanced/distorted utility voltage conditions", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol. 37, No. 1, pp. 847-865, 2019.
- [2] Singh, A., "Performance Evaluation of Three Different Configurations of DSTATCOM with Nonlinear Loads", *IETE Journal of Research*, Vol. 56, No. 6, pp. 313-326, 2010.
- [3] Yunfei, X., Xiangning, X., Yamin, S., Yunbo, L., "Voltage Sag Compensation Strategy for Unified Power Quality Conditioner with Simultaneous Reactive Power Injection, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy (MPCE)*", Vol. 4, Issue 1, pp. 113-122, 2016.
- [4] Patel, A., Mathur, H. D., Bhanot, S., "A New SRF-Based Power Angle Control Method for UPQC-DG to Integrate Solar PV into Grid", *International Transactions On Electrical Energy Systems*, Vol. 29, Issue 1, e2667, 2019.
- [5] Torabi, S. F., Nazarpour D., Shayestehfard, Y., "Compensation of Sags and Swells Voltage Using Dynamic Voltage Restorer (DVR) During Single Line to Ground and Three-Phase Faults", *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, Vol. 4, Issue 12, No. 3, pp. 126-132, 2012.
- [6] Zadehbagheri, M., Ildarabadi R., Baghaeinejad M., "Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag/Swell Compensation in Power Distribution Networks: A Review", *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, Vol. 5, No. 16, pp. 2258-2275, 2015.
- [7] Ramasamy M., Thangavel, S., "Optimal Utilization of PV Solar System as DVR (PV-DVR) for a Residence or Small Industry", *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 295-304, 2013.
- [8] Sharma, G., Bhatia, V., and Chakarvorty, J., "Voltage Sag and Swell Mitigation Using Dynamic Voltage Restorer (DVR)", *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering*, Vol. 4, Issue 3, pp. 195-204, 2018.
- [9] Sharma, G., Bhatia, V., Chakarvorty, J., "Voltage Sag and Swell Mitigation Using Dynamic Voltage Restorer (DVR)", *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering*, Vol. 4, Issue 3, pp. 195-204, 2018.
- [10] Jeevitha, V. M., Mythili, A., "Improvement of Voltage Sag Compensation Scheme for Dynamic Voltage Restorer", *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 3, Issue 1, pp. 383-388, 2017.
- [11] Patel, D., Goswami, A. K., Singh, S. K., "Voltage Sag Mitigation in an Indian Distribution System Using Dynamic Voltage Restorer," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 71, pp. 231-241, 2015.
- [12] Kamatchi Kannan, V., Rengarajan, N., "Photovoltaic Based Distribution Static Compensator for Power Quality Improvement", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 42, pp. 685-692, 2012.
- [13] Ramasamy, M. and Thangavel, S., "Photovoltaic Based Dynamic Voltage Restorer with Power Saver Capability

مروودشت مشغول به تحصیل می‌باشد. فعالیتهای پژوهشی ایشان در زمینه ادوات FACTS، کیفیت توان و انرژی های تجدیدپذیر می‌باشد.



محسن سیماب در اقلید متولد شد (۱۳۶۰).

تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه امیرکبیر تهران (۱۳۸۳) و کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی مهندسی برق از دانشگاه تربیت مدرس تهران (به ترتیب در سالهای ۱۳۸۵ و

۱۳۸۹) سپری کرده است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد مروودشت می‌باشد. فعالیتهای پژوهشی ایشان در زمینه بهره برداری سیستم های قدرت، قابلیت اطمینان سیستم های قدرت و تنظیم سیستمهای توزیع برق می‌باشد.



مهدی نفر در مروودشت متولد شد (۱۳۵۸).

تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه امیرکبیر تهران (۱۳۸۱) و کارشناسی ارشد

مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تربیت مدرس تهران (۱۳۸۳) و دکتری تخصصی برق از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (۱۳۹۰) سپری کرده است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد مروودشت می‌باشد. فعالیتهای پژوهشی ایشان در زمینه حالات گذرای سیستم قدرت، حفاظت صاعقه و بهینه سازی سیستم های قدرت می‌باشد.

¹ Voltage Sag

² Dynamic Voltage Restorer (DVR)

³ Photovoltaic Array (PV)

⁴ Sinusoidal PWM (SPWM)

⁵ Voltage Source Converter (VSC)

⁶ Interleaved Boost Converter (IBC)

⁷ Hysteresis Voltage Control

⁸ Total Harmonic Distortion (THD)

⁹ Synchronous Reference Frame Theory

¹⁰ Phase Lock Loop (PLL)

[27] Hendawi, E., Khater, F., Shaltout, A., "Analysis, Simulation and Implementation of Space Vector Pulse Width Modulation Inverter", Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, January 2006.

[28] Nourmohamadi, H., Bektas, S. I., Hosseini, S. H., Babaei, E., Sabahi, M., "A conventional dynamic voltage restorer with fault current limiting capability", 9th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perception, ICSCCW 2017, Budapest, Hungary, 22-23 August 2017.

[29] Aziz, M., Kumar, V., Chauhan, A., Thakur, B., "Power Quality Improvement by Suppression of Current Harmonics Using Hysteresis Controller Technique", International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Vol. 2, Issue 2, May 2013.

[30] Jain, N., Gupta, A., "Comparison between Two Compensation Current Control Methods of Shunt Active Power filter", International Journal of Engineering Research and General Science, Vol. 2, Issue 5, August-September, 2014.

[31] Ezoji, H., Fazlali, M., Ghatresamani, A., Nopour, M., "A Novel Adaptive Hysteresis Band Voltage Controller for Dynamic Voltage Restorer", European Journal of Scientific Research, Vol. 37 No. 2, pp.240-253, 2009.

[32] Jowder, F. A., "Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer (DVR) Based On Hysteresis Voltage Control", The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, Taiwan, 5-8 November 2007.

[33] Thaha, H. S., Deva Prakash, T. R., "Reduction of Power Quality Issues in Micro-Grid using GA Tuned PI Controller Based DVR", International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, Vol. 8, Issue 10, 2019.

[34] Kanjiya, P., Singh, B., Chandra, A., Al-Haddad, K., "SRF Theory Revisited to Control Self-Supported Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Unbalanced and Nonlinear Loads", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 5, 2013.

[35] Valderrabano, A., Ramirez, J. M., "DSTATCOM regulation by a fuzzy segmented PI controller", Electric Power Systems Research, Vol. 80, No. 6, p. 707-715, 2010.

[36] Mahdianpoor, F. M., Hooshmand, R. A., Ataei, M., "A New Approach to Multifunctional Dynamic Voltage Restorer Implementation for Emergency Control in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 2, April 2011.

رزومه



حمید کریمی در کازرون متولد شد (۱۳۶۲).

تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون (۱۳۸۵) و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی

واحد دزفول (۱۳۹۰) سپری کرده است و در حال حاضر در رشته سیستم های قدرت در مقطع دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد

Power Quality Improvement of Power Distribution Systems Using Improved DVR-PV Hybrid Scheme Based on Interleaved Chopper and Hysteresis Modulation

Hamid Karimi¹, Mohsen Simab^{2*}, Mehdi Nafar³

- 1- Ph.D Student, Department of Electrical Engineering, College of Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, karimi.hamid@miau.ac.ir
- 2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, College of Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, msimab@miau.ac.ir
- 3- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, College of Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, mnafar@miau.ac.ir

Abstract: Dynamic Voltage Restorer (DVR) is one of the voltage compensation equipment. Voltage quality injected by of this equipment depends on the quality of DC link voltage and the type of control system modulation. The photovoltaic array can be used to store the DC link of this equipment. To increase the output voltage of the photovoltaic array to the required DC voltage level, a standard boost chopper is used which reduces the quality of the compensator voltage due to the high voltage ripple. Using well-designed choppers such as interleave can in addition to increasing the photovoltaic array voltage, reduce the ripple DC link voltage and thus the harmonic content of the voltage injected by the compensator. Applying appropriate pulse bandwidth modulation to the control system of this equipment can also be effective in reducing harmonic content and improving voltage quality. In this paper, in order to reduce the total harmonic distortion (THD) of the compensator injected voltage and consequently to improve the load voltage quality, the interleave boost converter at DC compensator link and the hysteresis modulation in the controller scheme of this hybrid compensator are used and the simulation results are presented. The result of the proposed system is compared with the results of the hybrid compensator based on conventional boost chopper and sinusoidal modulation. The simulations are done using Matlab/Simulink.

Keywords: Power Quality, Photovoltaic Array (PV), Interleaved Converter, Hysteresis Modulation, Dynamic Voltage Restorer (DVR).