

عملکرد جبران‌ساز استاتیکی توزیع (D-STATCOM) مبتنی بر مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی در برابر کمبود و بیشبود ولتاژ

حسن براتی*^۱، حمید کریمی^۲، علیرضا سیفی^۳، وحید خرمشاهی^۴

* ۱- استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران، barati216@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد برق، شرکت پالایش گاز پارسیان، مهر، ایران، hkfars@yahoo.com

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، siefi@shirazu.ac.ir

۴- مربی گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران، vkhorramshahi@yahool.com

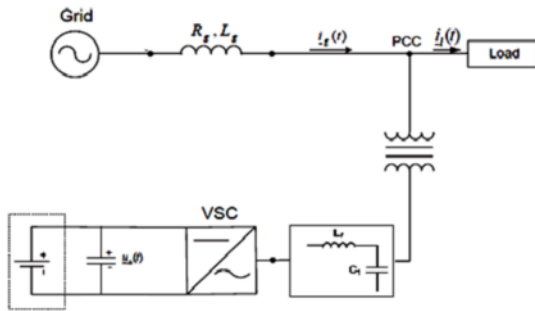
چکیده: برای بهبود کیفیت توان شبکه‌های توزیع، روش‌های زیادی استفاده می‌شود که کارآمدترین و مؤثرترین آنها استفاده از ادوات Custom Power می‌باشد. این ادوات براساس اصول کار مبدل منبع ولتاژ VSC طراحی شده‌اند و هر یک از تجهیزات آن برای جبران بعضی از پدیده‌های کیفیت توان مناسب است. جبران‌ساز استاتیکی توزیع یا D-STATCOM یکی از تجهیزات Custom Power می‌باشد که با تزریق جریان، توان راکتیو شین را کنترل می‌کند و باعث تثبیت ولتاژ شین در محل نصب می‌شود. در این مقاله، عملکرد D-STATCOM در اصلاح کمبود و بیشبود ولتاژ در شبکه توزیع براساس مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM)^۲ و مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (SVPWM)^۳ با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود و برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی مبدل منبع ولتاژ این تجهیز از هر یک از این مدولاسیون‌ها استفاده می‌شود و عملکرد D-STATCOM در صورت بکارگیری هر یک از این مدولاسیون‌ها با هم مقایسه خواهد شد. D-STATCOM مبتنی بر مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی بطور مؤثرتری کمبود ولتاژ و بیشبود ولتاژ را بازبایی می‌کند و همچنین باعث ایجاد اعوجاج هارمونیکی کمتری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کمبود ولتاژ، بیشبود ولتاژ، جبران‌ساز استاتیکی توزیع (D-STATCOM)، مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM)، مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (SVPWM).

۱- مقدمه

استاندارد IEEE-1159-1995 کمبود ولتاژ بصورت «کاهش ناگهانی مقدار مؤثر ولتاژ به میزان ۱۰٪ تا ۹۰٪ در فرکانس نامی و در مدت زمان بین ۰/۵ سیکل تا ۱ دقیقه» و بیشبود ولتاژ بصورت «افزایش ناگهانی مقدار مؤثر ولتاژ به میزان بیشتر از ۱۱۰٪ در فرکانس نامی و در مدت زمان بین ۰/۵ سیکل تا ۱ دقیقه» تعریف شده است. از عوامل ایجاد کمبود ولتاژ، راه‌اندازی بارهای بزرگ و سنگین القایی، برق‌دار کردن ترانسفورماتورها و اتصال کوتاه‌ها و از عوامل ایجاد بیشبود ولتاژ، خطاهای اتصال کوتاه تک‌فاز، دوفاز، در سرویس قرار گرفتن بانک خازنی بزرگ، از سرویس خارج کردن بارهای سنگین می‌باشد. در راستای طرح و توسعه سیستم‌های الکترونیک قدرت و بالا بردن کیفیت توان، مؤسسات تحقیقات توان الکتريکی، ادوات Custom Power را در شبکه‌های توزیع معرفی کرده‌اند که این تجهیزات درصدد بهبود

گسترش و رشد روزافزون مصرف انرژی الکتريکی و رشد بارهای حساس از جمله دستگاه‌های الکترونیک و حساسیت زیاد این ادوات به انواع اغتشاشات توان، آنها را مواجه با پدیده‌های مختلفی نموده است. واژه کیفیت توان به عنوان یک مفهوم فراگیر برای انواع مختلف اغتشاشات کیفیت توان شبکه بکار می‌رود. به طور کلی هر گونه مشکلی که باعث تغییر در ولتاژ، جریان یا فرکانس گردد و موجب خرابی و یا عملکرد نادرست تجهیزات مصرف‌کننده شود، به عنوان یک مشکل کیفیت توان مطرح است. از مهمترین مشکلات کیفیت توان، کمبود ولتاژ^۴ و بیشبود ولتاژ^۵ می‌باشد که از مهمترین چالش‌های شرکت‌های توزیع برق در مواجهه با صنایع پیشرفته می‌باشند و تقریباً ۸۰٪ از مشکلات کیفیت برق موجود در سیستم را شامل می‌شود. در



شکل (۱): شماتیک D-STATCOM متصل شده به شبکه توزیع [۵]

• واحد ذخیره‌ساز انرژی

باتری‌ها، ابرخازن‌ها، مبدل دیودی با یک خازن موازی، چرخ‌لنگرها (FESS) و ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابرسانا (SMES) می‌توانند بعنوان منبع ذخیره انرژی DC در D-STATCOM استفاده شوند. همچنین منبع ولتاژ DC در D-STATCOM می‌تواند یک خازن باشد که ولتاژ آن می‌تواند با کنترل کنورتر بالا یا پایین برود. در چنین روشی انرژی ذخیره شده در خازن افزایش یا کاهش می‌یابد. البته در این صورت فقط امکان تزریق یا جذب توان راکتیو وجود دارد.

• واحد فیلتر

معمولاً از یک فیلتر پسیو شامل سلف یا سلف و خازن در خروجی اینورتر استفاده می‌شود که باعث کاهش ریبیل ولتاژ تولید شده توسط کلیدزنی اینورترهای D-STATCOM می‌شود. همچنین از راکتانس ترانسفورماتور تزریق می‌توان بعنوان بخشی از سلف فیلتر استفاده کرد.

• ترانسفورماتور تزریق

در D-STATCOM ترانسفورماتور تزریق بصورت موازی با شبکه وصل می‌شود. جریان تزریقی توسط D-STATCOM از طریق راکتانس ترانسفورماتور اتصال یا تزریق به شبکه تزریق می‌شود. هدف از قرار دادن ترانسفورماتور، حفاظت و فراهم کردن ایزولاسیون بین ساق‌های اینورتر می‌باشد. این کار از اتصال کوتاه شدن خازن ذخیره انرژی DC جلوگیری می‌کند. جهت کاهش هزینه معمولاً از یک ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ استفاده می‌شود که سیم‌پیچ ثانویه، ولتاژ سطح انتقال را به ولتاژ سطح توزیع انتقال می‌دهد و از سیم‌پیچ ثالثیه آن جهت اتصال D-STATCOM به شبکه استفاده می‌شود. اتصال این ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ معمولاً بصورت $Y/\Delta/\Delta$ می‌باشد [۹ و ۱۰]. انتخاب اجزای ترانسفورماتور اتصال، تأثیر زیادی بر عملکرد جبران کنندگی D-STATCOM دارد. راکتانس ترانسفورماتور اتصالی را می‌توان به عنوان یک راکتور که هارمونیک‌های متوسط و بالای ولتاژ خروجی D-STATCOM را تضعیف می‌کند در نظر گرفت.

کیفیت توان در شبکه توزیع می‌باشد [۱]. در مرجع [۲]، انواع تجهیزات Custom Power و کاربردهای آنها شرح داده شده است.

تجهیزات Custom Power براساس اصول کار مبدل منبع ولتاژ VSC طراحی شده‌اند و مبدل منبع ولتاژ قسمت اصلی آنها می‌باشد. تکنولوژی مبدل منبع ولتاژ VSC چندین مشخصه مطلوب از قبیل پاسخ سریعتر، تأثیر کم خروجی با تغییرات شبکه و امکان استفاده با تجهیزات ذخیره انرژی جهت جبران‌سازی همزمان توان اکتیو و راکتیو را دارد. کنترل ولتاژ خروجی این ادوات توسط الگوی کلیدزنی PWM^۲ که باعث کاهش تولید هارمونیک‌های مرتبه پایین می‌گردد انجام می‌شود [۳ و ۴].

یک نمونه از تجهیزات Custom Power، جبرانگر سنکرون استاتیکی توزیع (D-STATCOM) می‌باشد که در سال‌های اخیر توجه زیادی به آن شده است. پاسخ سریع و عدم تولید هارمونیک‌های فرکانس پایین برای از بین بردن نامتعادلی، جبران توان راکتیو، حذف هارمونیک‌ها، جبران مؤلفه منفی، تنظیم ولتاژ سیستم AC و کاهش فلیکر از مشخصه‌های بارز D-STATCOM می‌باشد [۵]. در مرجع [۶]، مدهای عملکردی D-STATCOM بیان شده است.

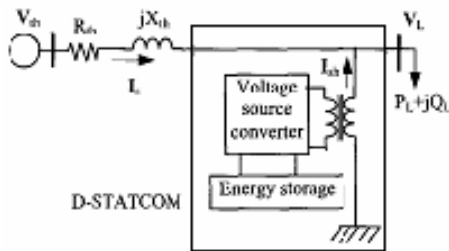
الگوهای کلیدزنی PWM مختلفی برای تولید سیگنال‌های سوئیچ‌زنی مبدل منبع ولتاژ بکار رفته در D-STATCOM وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خاص خودشان را دارند از جمله SPWM و SVPWM. در مرجع [۷]، روابط ریاضی و مراحل پیاده‌سازی نرم-افزاری مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (SVPWM) بیان شده است.

در این مقاله از این تجهیز برای تنظیم ولتاژ و جبران‌سازی کمبود و بیشبود ولتاژ استفاده می‌شود و عملکرد این تجهیز در صورت بکارگیری هر یک از مدولاسیون‌های پهنای پالس سینوسی (SPWM) و مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (SVPWM) برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی مبدل منبع ولتاژ آن بررسی و مقایسه می‌شود. مبدل منبع ولتاژ مبتنی بر مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی از ولتاژ شین DC بطور موثرتری استفاده می‌کند و اعوجاج هارمونیک کل (THD)^۳ کمتری تولید می‌کند و دارای مدولاسیون دامنه بالاتر و در نتیجه ولتاژ خروجی بالاتر می‌باشد. به عبارتی در شرایط اغتشاش جبران‌سازی ولتاژ را بهتر انجام می‌دهد.

۲- ساختار و اجزای D-STATCOM

D-STATCOM از یک مبدل منبع ولتاژ DC به AC (اینورتر)، منبع ولتاژ DC، خازن DC، فیلتر AC، ترانسفورماتور تزریق موازی (ترانسفورماتور کوپلینگ) و یک استراتژی کنترلی تشکیل شده است و شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده است [۸]. اجزاء و ساختار آن در ادامه بطور خلاصه توضیح داده می‌شوند.

از روابط (۱) و (۲) مشاهده می‌شود که مقدار جریان راکتیو مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن ولتاژ اتصال بار در مقدار مرجع طی کمبود ولتاژ با امیدانس سیستم رابطه معکوس دارد.



شکل (۲): مدار معادل تونن شبکه با حضور D-STATCOM [۱۰]

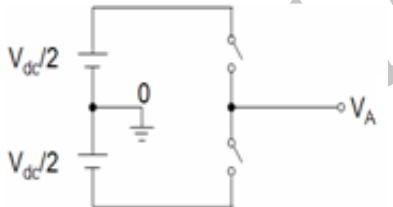
توان ظاهری تزریقی توسط D-STATCOM بصورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$S_{th} = V_L I_{sh}^* \quad (3)$$

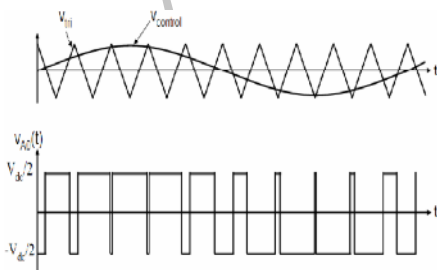
هنگامیکه جریان تزریقی شنت I_{sh} با V_L عمود است (جریان تزریقی راکتیو خازنی خالص باشد)، هیچ توان اکتیوی به سیستم برای اصلاح ولتاژ تزریق نمی‌شود و اصلاح ولتاژ فقط با تزریق توان راکتیو انجام می‌شود [۹ و ۱۰].

۴- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM)

شکل (۳) مدار یک اینورتر تک‌فاز با لینک DC زمین شده در وسط شین را نشان می‌دهد و شکل (۴) اساس عملکرد مدولاسیون پهنای پالس سینوسی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): مدار معادل یک اینورتر تک فاز [۱۱ و ۱۲]



شکل (۴): مدولاسیون پهنای پالس سینوسی [۱۱ و ۱۲]

همچنان که در شکل (۴) نشان داده شده است در مدولاسیون پهنای پالس سینوسی، پالسها از تقاطع موج سینوسی با موج حامل (مثلی) ایجاد می‌شوند و ولتاژ خروجی اینورتر طبق رابطه (۴) تعیین می‌شود:

• خازن DC

معمولاً از خازن به عنوان منبع DC در اینورتر D-STATCOM استفاده می‌شود و در نتیجه باعث می‌شود D-STATCOM توان راکتیو تولید و یا جذب کند. این خازن بصورت موازی با اینورتر D-STATCOM متصل می‌شود. هنگامی که ولتاژ شبکه بیشتر از ولتاژ D-STATCOM می‌باشد خازن شارژ می‌شود و هنگامیکه ولتاژ شبکه کمتر از ولتاژ خروجی اینورتر می‌باشد خازن دشارژ می‌شود. برای تزریق توان اکتیو توسط D-STATCOM باید یک منبع خارجی یا سیستم ذخیره انرژی استفاده شود. وظیفه خازن DC در این شرایط ثابت نگه داشتن مقدار ولتاژ DC می‌باشد. در این حالت خازن به عنوان یک منبع ذخیره انرژی بکار نمی‌رود.

• مبدل منبع ولتاژ

بلوک اصلی D-STATCOM یک مبدل منبع ولتاژ (اینورتر) می‌باشد که ولتاژ ورودی DC را به ولتاژ سه‌فاز AC خروجی در فرکانس اصلی تبدیل می‌کند. این ولتاژ سه‌فاز با سیستم AC هم‌فاز هستند و از طریق راکتانس ترانسفورماتور کوپلینگ با سیستم کوپله می‌شوند. تنظیم مناسب دامنه و فاز ولتاژ خروجی D-STATCOM باعث می‌شود کنترل مؤثری روی تبادل توان اکتیو و راکتیو بین D-STATCOM و سیستم AC ایجاد شود. اینورتر سه‌فاز استفاده شده در D-STATCOM، معمولاً اینورتر سه فاز دو سطح پل گرتز می‌باشد که از ۶ کلید IGBT، GTO، MOSFET یا IGCT تشکیل شده است و از مدولاسیون پهنای پالس برای تولید پالس‌های آتش سوئیچ‌ها استفاده می‌کند.

۳- محاسبه جریان و توان تزریقی D-STATCOM

در جبران کمبود ولتاژ

D-STATCOM به صورت یک جبران‌کننده وار استاتیکی موازی عمل می‌کند که جریان اندوکتیو یا خازنی خروجی‌اش می‌تواند مستقل از ولتاژ سیستم کنترل شود. اندازه ولتاژ جبران شده بوسیله مشخصات سیستم و بار محدود می‌شود. تنظیم مناسب دامنه و فاز ولتاژ خروجی D-STATCOM باعث می‌شود کنترل مؤثری روی تبادل توان اکتیو و راکتیو بین D-STATCOM و سیستم AC ایجاد شود و این تجهیز توان اکتیو و راکتیو قابل کنترل تولید و یا جذب کند [۱۰].

شکل (۲) نشان می‌دهد که تزریق جریان موازی I_{sh} کمبود ولتاژ را بوسیله تنظیم افت ولتاژ دو سر امیدانس سیستم Z_{th} اصلاح می‌کند. مقدار جریان I_{sh} بوسیله تنظیم ولتاژ خروجی کنورتر کنترل می‌شود.

جریان تزریقی شنت بصورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۹ و ۱۰]:

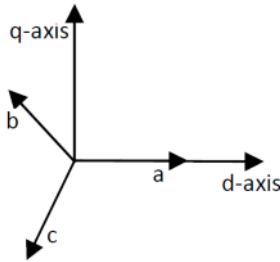
$$I_{sh} = I_L - I_S = I_L - \frac{V_{th} - V_L}{Z_{th}} \quad (1)$$

با فرض اینکه زاویه ولتاژ بار صفر در نظر گرفته شود داریم:

$$I_{sh} \angle \alpha = I_L \angle (-\phi) - \frac{V_{th}}{Z_{th}} \angle (\delta - \beta) + \frac{V_L}{Z_{th}} \angle -\beta \quad (2)$$

بردار فضایی در صفحه $\alpha\beta$ می‌باشد. مؤلفه‌های $\alpha - \beta$ ، مؤلفه‌های تبدیل کلارک می‌باشند. این نوع PWM اعوجاج هارمونیک کمتری در ولتاژهای خروجی VSC تولید می‌کند.

برای پیاده‌سازی PWM بردار فضایی همچنانکه در شکل (۶) نشان داده شده است معادلات ولتاژ در قاب مرجع سه فاز abc به قاب مرجع dq ساکن یا $\alpha\beta$ که شامل محور d (افقی) و q (عمودی) می‌باشد تبدیل می‌شوند.



شکل (۶): رابطه قاب مرجع سه فاز و قاب مرجع dq ساکن [۱۲]

از شکل (۶) رابطه بین این دو قاب مرجع بصورت معادله (۶) می‌باشد:

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

و f می‌تواند یک متغیر ولتاژ یا جریان باشد.

شش بردار غیر صفر و دو بردار صفر جهت مدولاسیون بردار فضایی برای اینورتر دو سطحی امکان پذیر است. شش بردار غیر صفر $V1-V6$ بصورت محورهای یک شش ضلعی نشان داده شده‌اند (شکل ۶) و توان تحویلی را فراهم می‌کنند. زاویه بین هر دو بردار غیر صفر مجاور هم 60° درجه می‌باشد، در ضمن دو بردار صفر $V0$ و $V7$ در مبدأ می‌باشند و ولتاژ صفر را اعمال می‌کنند. هشت بردار، بردارهای فضایی اصلی نامیده می‌شوند و بصورت $V0, V1, \dots, V7$ نامگذاری می‌شوند. طول بردارهای $V1, V2, V6$ واحد می‌باشد و طول بردارهای $V0$ و $V7$ صفر می‌باشد و این هشت بردار، فضای برداری-ولتاژ را تشکیل می‌دهند. در فضای برداری بر طبق اصل تعادل روابط زیر بین بردارها برقرار می‌باشند:

$$\bar{V}_1 = -\bar{V}_4, \quad \bar{V}_2 = -\bar{V}_5, \quad \bar{V}_3 = -\bar{V}_6 \quad (8)$$

$$\bar{V}_1 + \bar{V}_3 + \bar{V}_5 = 0 \quad (9)$$

همچنانکه در شکل (۷) نشان داده شده است فضای برداری ولتاژ به ۶ سکتور تقسیم می‌شود و هر سکتور شامل یک مثلث متساوی‌الاضلاع است که هر ضلع آن بر روی مقدار واحد نرمالیزه شده است. دو ضلع هر یک از این مثلث‌ها که رأس آنها در مرکز این دیاگرام است دو بردار حالت سوئیچینگ را مشخص می‌کنند. مرکز این شش ضلعی دو بردار صفر (000) و (111) را مشخص می‌کند.

هدف از تکنیک SVPWM، تقریب زدن بردار ولتاژ مرجع V_{ref} با استفاده از ۸ الگوی کلیدزنی می‌باشد. یک روش، بدست آوردن متوسط ولتاژ خروجی در یک دوره T می‌باشد [۱۴، ۱۵].

$$V_{control} > V_{tri} \Rightarrow V_{AO} = V_{dc}/2$$

$$V_{control} < V_{tri} \Rightarrow V_{AO} = -V_{dc}/2 \quad (4)$$

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

همچنین ولتاژ خروجی اینورتر ویژگیهای زیر را دارد:

- فرکانس PWM با فرکانس موج حامل (موج مثلی) برابر است.
- دامنه توسط پیک ولتاژ سینوسی ($V_{CONTROL}$) کنترل می‌شود.
- مؤلفه فرکانس اصلی بوسیله فرکانس موج سینوسی ($V_{CONTROL}$) کنترل می‌شود.

شاخص مدولاسیون بصورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} = \frac{peak(V_{AO1})}{\frac{V_{dc}}{2}} \quad (5)$$

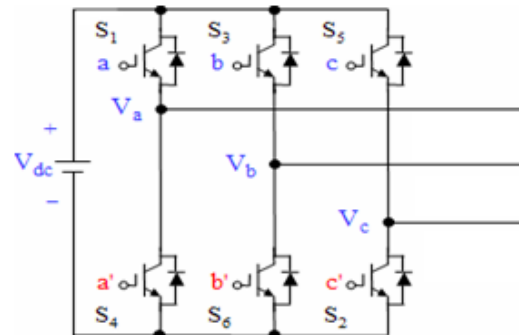
که m_a شاخص مدولاسیون دامنه و V_{AO1} مؤلفه فرکانس اصلی V_{AO} می‌باشد.

در PWM سینوسی سه فاز، سیگنال‌های مدوله‌کننده مرجع سه‌فاز با یک موج حامل مثلی جهت تولید سیگنال‌های PWM مقایسه می‌شوند و از تقاطع هر موج سینوسی با موج مثلی ولتاژهای فاز بدست می‌آیند [۷].

۵-مدولاسیون پهناي پالس بردار فضایی (SVPWM)

مدولاسیون پهناي پالس بردار فضایی (SVPWM) یک تکنیک پیشرفته‌تری برای تولید موج سینوسی می‌باشد و یک ولتاژ بالا با THD کمتر فراهم می‌کند. مدولاسیون پهناي پالس بردار فضایی (SVPWM) به عنوان مناسب‌ترین روش برای کنترل ولتاژ مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC) می‌باشد [۱۱-۱۴].

مدار یک مبدل منبع ولتاژ PWM سه فاز دو سطحی در شکل (۵) نشان داده شده است.

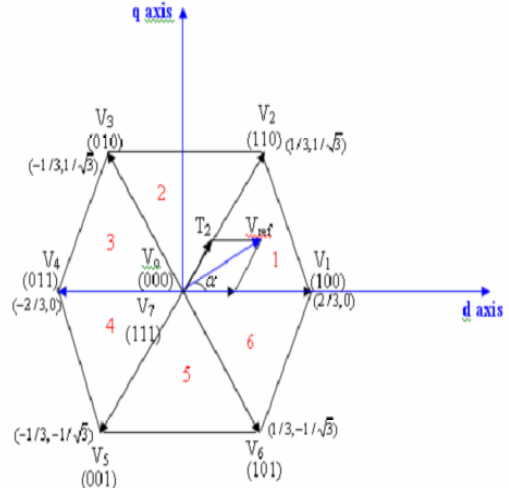


شکل (۵): مبدل منبع ولتاژ سه فاز [۸]

$S1-S6$ ، شش کلید ادوات الکترونیک قدرت می‌باشد که به وسیله سوئیچ کردن a' و b' ، b و c' ، c و a' ، a و b' ، b و c' که یکی از سوئیچ‌های بالایی on می‌باشد یعنی هنگامی که a یا b یا c ، ۱ می‌باشد سوئیچ متناظر پایینی off می‌باشد یعنی a' ، b' یا c' صفر می‌باشد. بنابراین حالت‌های on و off سوئیچ‌های بالایی $S1$ ، $S3$ ، $S5$ برای تعیین ولتاژ خروجی استفاده می‌شود. روش SVPWM روشی متفاوت از مدولاسیون PWM می‌باشد و مبتنی بر نمایش ولتاژهای

جدول (۱): الگوهای کلید زنی و بردارهای خروجی [۱۱]

| بردارهای ولتاژ | بردار سوئیچینگ | | | ولتاژ فاز | | | ولتاژ خط | | |
|----------------|----------------|---|---|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | V_{an} | V_{bn} | V_{cn} | V_{ab} | V_{bc} | V_{ca} |
| V_0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V_1 | 1 | 0 | 0 | $2/3$ | $-1/3$ | $-1/3$ | 1 | 0 | -1 |
| V_2 | 1 | 1 | 0 | $1/3$ | $1/3$ | $-2/3$ | 0 | 1 | -1 |
| V_3 | 0 | 1 | 0 | $-1/3$ | $2/3$ | $-1/3$ | -1 | 1 | 0 |
| V_4 | 0 | 1 | 1 | $-2/3$ | $1/3$ | $1/3$ | -1 | 0 | 1 |
| V_5 | 0 | 0 | 1 | $-1/3$ | $1/3$ | $2/3$ | 0 | -1 | 1 |
| V_6 | 1 | 0 | 1 | $1/3$ | $-2/3$ | $1/3$ | 1 | -1 | 0 |
| V_7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



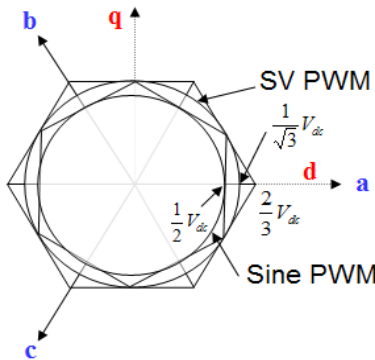
شکل (۷): سکتورها و بردارهای کلید زنی [۱۱]

۵-۱- حالت‌های کلیدزنی

در بحث زیر حالت‌های سوئیچ‌های پل بالایی ارائه خواهد شد و حالت‌های سوئیچ‌های پایینی مکمل آن است. همچنانکه در شکل (۸) نشان داده شده ۸ الگوی کلیدزنی on و off برای سوئیچ‌های قدرت بالایی وجود دارد. حالت on و off سوئیچ‌های پایینی مخالف سوئیچ‌های بالایی می‌باشد. یک یعنی سوئیچ on و صفر یعنی سوئیچ off می‌باشد.

جدول (۱) جزئیات ولتاژهای خط و فاز برحسب ولتاژ dc ورودی برای هشت حالت کلیدزنی را نشان می‌دهد.

مکان هندسی ماکزیمم ولتاژ هر دو مدولاسیون سینوسی و بردار فضایی در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): مقایسه مکان هندسی ماکزیمم ولتاژ در SVPWM و SPWM [۱۲و۱۱]

مکان هندسی بردار مرجع در SVPWM درون یک دایره به شعاع $\frac{1}{\sqrt{3}} * V_{dc}$ می‌باشد و مکان هندسی بردار مرجع در SPWM درون یک دایره به شعاع $\frac{1}{2} * V_{dc}$ می‌باشد.

$$\frac{V_{MAX \text{ SVPWM}}}{V_{MAX \text{ SPWM}}} = \frac{1/\sqrt{3}}{1/2} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.1547 \quad (۱۰)$$

پس ماکزیمم ولتاژی که توسط SVPWM نسبت به SPWM می‌توان ایجاد کرد ۱۵٪ بیشتر می‌باشد [۱۲و۱۱].

به عبارتی ماکزیمم شاخص مدولاسیون دامنه (m_a) در رنج خطی در SVPWM، $\frac{2}{\sqrt{3}}$ می‌باشد، در حالیکه ماکزیمم شاخص مدولاسیون دامنه در SPWM، ۱ می‌باشد [۱۲و۱۱].

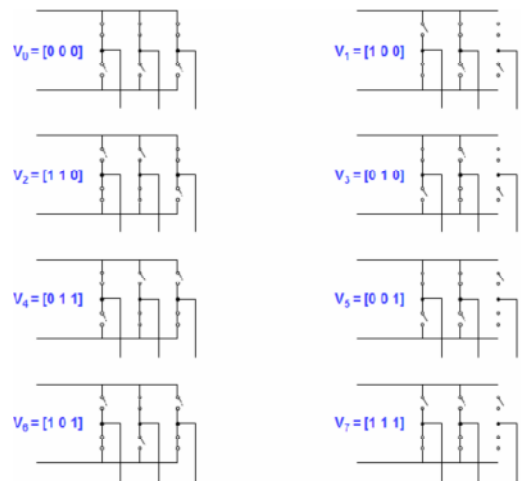
۵-۲- پیاده سازی SVPWM

SVPWM بصورت مراحل زیر پیاده‌سازی می‌شود [۱۱-۱۴]:

- گام ۱: تعیین V_d ، V_q و V_{ref} و زاویه α
- گام ۲: تعیین دوره زمانی T_1 ، T_2 و T_0
- گام ۳: تعیین زمان سوئیچ‌زنی هر کلید (S_1 تا S_6).

۵-۲-۱- تعیین V_d ، V_q ، V_{ref} و زاویه α :

از شکل (۱۰)، V_d ، V_q ، V_{ref} و زاویه α به صورت زیر تعیین می‌شوند:



شکل (۸): هشت حالت کلیدزنی بردارهای ولتاژ [۱۲و۱۱]

$$+T_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{3} \\ \sin \frac{\pi}{3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$T_1 = T_Z \cdot a \cdot \frac{\sin(\frac{\pi}{3}-\alpha)}{\sin(\frac{\pi}{3})} \quad (0 \leq \alpha \leq 60^\circ) \quad (19)$$

$$T_2 = T_Z \cdot a \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\frac{\pi}{3})} \quad (20)$$

$$T_0 = T_Z - (T_1 + T_2) \quad (21)$$

$$a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3} \cdot V_{dc}} \quad (22)$$

$$T_Z = \frac{1}{f_Z} \quad (23)$$

ب: محاسبه زمان سوئیچ زنی در هر سکتور

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_Z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \cdot \sin(\frac{n}{3}\pi - \alpha) \quad (24)$$

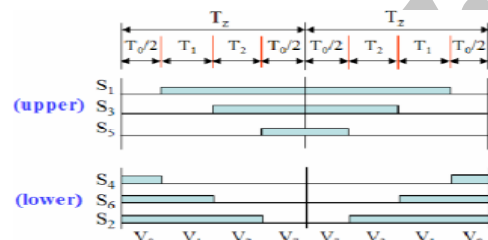
$$T_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_Z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \cdot \sin(\alpha - \frac{n-1}{3} \cdot \pi) \quad (25)$$

$$T_0 = T_Z - (T_1 + T_2) \quad (n = \text{sector 1 to 6}) \quad (0 \leq \alpha \leq 60^\circ)$$

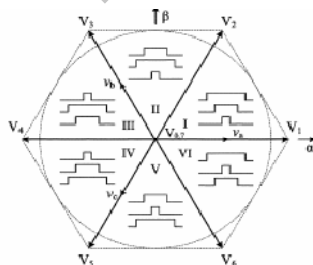
که T_1 و T_2 مدت زمان فعالیت بردارهای V_1 و V_2 و T_0 مدت زمان فعالیت بردارهای صفر می‌باشد [۱۱-۱۳].

۵-۲-۳- تعیین زمان سوئیچ زنی هر کلید (S1-S6)

الگوهای سوئیچ زنی PWM بردار فضایی در سکتور ۱ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. الگوی سوئیچ زنی سه سوئیچ ردیف بالایی اینورتر در هر سکتور در شکل (۱۳) نشان داده شده است و با توجه به این شکل، زمان سوئیچ زنی در هر سکتور در جدول (۲) لیست شده است.

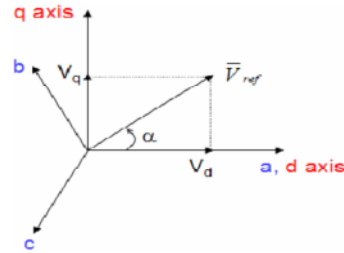


شکل (۱۲): الگوی کلیدزنی PWM بردار فضایی در سکتور ۱ [۱۱-۱۳]



شکل (۱۳): الگوی کلیدزنی کلیدهای بالایی هر ساق اینورتر در هر سکتور

[۱۵]



شکل (۱۰): بردار فضایی ولتاژ و مولفه‌های آن در صفحه dq [۱۱]

$$\begin{aligned} V_d &= V_{an} - V_{bn} \cdot \cos 60^\circ - V_{cn} \cdot \cos 60^\circ \\ &= V_{an} - \frac{1}{2} \cdot V_{bn} - \frac{1}{2} \cdot V_{cn} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_q &= 0 + V_{bn} \cdot \cos 30^\circ - V_{cn} \cdot \cos 30^\circ \\ &= V_{an} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_{cn} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$|\bar{V}_{ref}| = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (14)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right) = \omega t = 2\pi f t \quad (15)$$

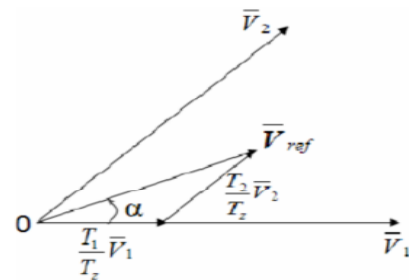
$$\frac{(n-1)\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{n\pi}{3}, \quad n=1,2,\dots,6$$

که n شماره سکتور می‌باشد [۱۱ و ۱۲].

۵-۲-۲- تعیین دوره زمانی T0 و T2 ، T1

الف: محاسبه زمان سوئیچ زنی در سکتور ۱

با استفاده از شکل (۱۱)، مدت زمان سوئیچینگ بصورت زیر محاسبه می‌شود:



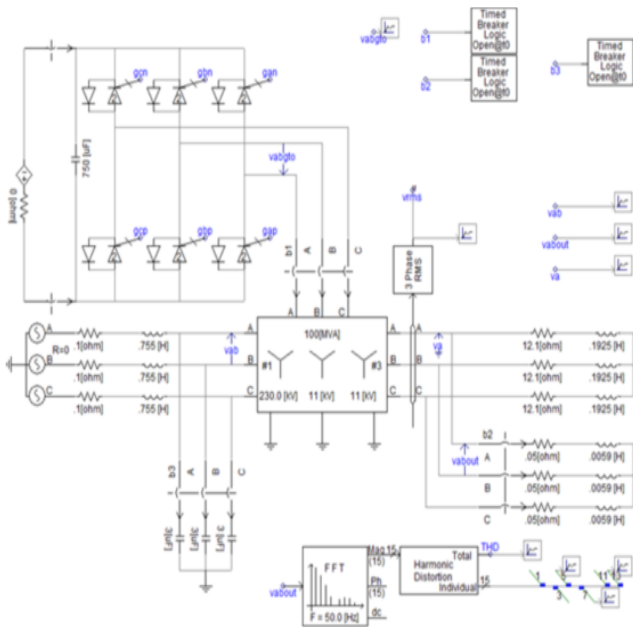
شکل (۱۱): بردار مرجع بصورت ترکیبی از بردارهای مجاور

در سکتور ۱ [۱۱ و ۱۳]

$$\int_0^{T_1} \bar{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_Z} \bar{V}_0 dt \quad (16)$$

$$T_Z \cdot \bar{V}_{ref} = (T_1 \cdot \bar{V}_1 + T_2 \cdot \bar{V}_2) \quad (17)$$

$$\Rightarrow T_Z \cdot |\bar{V}_{ref}| \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} = T_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$



شکل (۱۵): شبیه‌سازی شبکه نمونه شامل D-STATCOM در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC

جدول (۲): محاسبه زمان سوئیچ‌زنی در هر سکتور [۸-۱۰]

| سکتور | سوییچ‌های پایینی (S_1, S_2, S_3) | سوییچ‌های بالایی (S_4, S_5, S_6) |
|-------|---|---|
| 1 | $S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ | $S_4 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ |
| 2 | $S_1 = T_1 + T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ | $S_4 = T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ |
| 3 | $S_1 = T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_2 + T_0 / 2$ | $S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_0 / 2$ |
| 4 | $S_1 = T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ | $S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ |
| 5 | $S_1 = T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ | $S_4 = T_1 + T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ |
| 6 | $S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_0 / 2$ | $S_4 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_2 + T_0 / 2$ |

۶- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

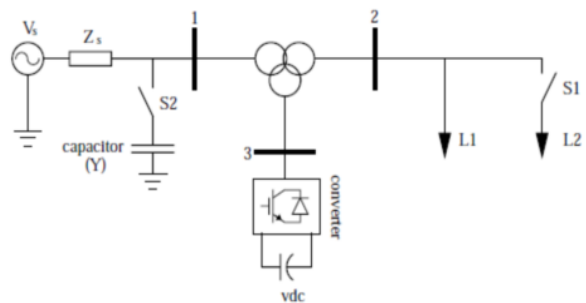
۶-۱- شبیه‌سازی نمونه با حضور D-STATCOM

شبکه نمونه استفاده شده برای انجام شبیه‌سازی جهت بکارگیری D-STATCOM در شکل (۱۴) نشان داده شده است [۱۰].

این سیستم توسط سیستم انتقال ۵۰ HZ و ۲۳۰ KV که بصورت مدار معادل تونن ارائه شده ایجاد شده است و تغذیه یک شبکه توزیع توسط یک ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه (Y/Y/Y) (۲۳۰/۱۱/۱۱ KV) صورت می‌گیرد. D-STATCOM اساساً برای تنظیم ولتاژ، اصلاح ضریب توان و حذف هارمونیک‌های جریان استفاده می‌شود. در این مقاله، این تجهیز برای تنظیم پیوسته ولتاژ بار در شرایط کمبود و بیشبود ولتاژ ناشی از تغییرات بار بکارگیری شده است [۱۰ و ۳].

مشخصات اجزاء و بارهای شبکه نمونه و مشخصات D-STATCOM بکار رفته در این شبکه برترتیب در جداول (پ-۱) و (پ-۲) در بخش پیوست‌ها داده شده است.

پیاده‌سازی این سیستم توسط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۱۴): دیاگرام تک خطی سیستم تست برای بکارگیری D-STATCOM [۱۰]

۶-۲- شبیه‌سازی سیستم کنترل D-STATCOM

مبتنی بر SPWM در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC

سیستم کنترل D-STATCOM مبتنی بر SPWM همچنانکه در بخش پیوست در شکل (پ-۱) نشان داده شده است زاویه ولتاژ را به این صورت کنترل می‌کند که ولتاژ مینا با ولتاژ RMS اندازه‌گیری شده در نقطه اتصال بار مقایسه شده و سیگنال خطا بدست می‌آید. این سیگنال بعد از عبور از یک کنترل‌کننده PI، زاویه δ را که برای رساندن خطا به صفر مورد نیاز است، تولید می‌کند. در این حالت ولتاژ بار به مقدار مینا بازگردانده می‌شود. خروجی کنترل‌کننده در ضریب ۵۷.۲۹ ضرب می‌شود تا زاویه خروجی کنترلر بر حسب درجه باشد. در سیستم کنترل، مدولاسیون فاز در سیگنال کنترل $V_{control}$ با استفاده از زاویه δ انجام می‌شود. سیگنال مدوله شده $V_{control}$ با یک سیگنال حامل مثلثی مقایسه شده و سیگنال‌های کلیدزنی را برای سوئیچ‌های VSC تولید می‌کند [۱۰ و ۳].

ضریب مدولاسیون دامنه سیگنال $V_{control}$ (m_a) و ضریب مدولاسیون فرکانس سیگنال مثلثی (m_f) پارامترهای اصلی SPWM می‌باشند. ضریب دامنه 1 pu و فرکانس کلیدزنی ۴۵۰ هرتز یعنی $m_f=9$ در نظر گرفته شده است. زاویه δ به فاز a در سیستم تولیدکننده PWM اعمال می‌شود و زوایای فازهای b و c به ترتیب با ۲۴۰ درجه و ۱۲۰ درجه شیفت تولید می‌شوند.

۶-۳- شبیه‌سازی سیستم کنترل D-STATCOM

مبتنی بر SVPWM در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC

برای پیاده‌سازی سیستم کنترل مبتنی بر SVPWM در نرم‌افزار PSCAD، به صورت مراحل زیر عمل می‌شود:

الف: محاسبه اندازه کمبود و بیشبود ولتاژ و تولید سیگنال مرجع

ب: محاسبه اندازه ولتاژ مرجع V_{ref} و زاویه α و تعیین سکتور

ج: محاسبه زمان در سرویس بودن دو بردار مجاور فعال و بردارهای صفر (T_1 ، T_2 و T_0)

د: محاسبه سیکل کاری (زمان سوئیچ‌زنی هر کلید در هر سیکل) و تولید سیگنال‌های مدولاسیون

هر یک از مراحل فوق در ۴ قسمت توسط نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی می‌شوند. این ۴ قسمت در شکل‌های (پ-۲-الف) تا (پ-۲-د) نشان داده شده‌اند.

در شکل (پ-۲-الف)، اندازه کمبود یا بیشبود ولتاژ و زاویه δ که برای رساندن خطا به صفر مورد نیاز است، جهت تعیین سیگنال‌های مرجع بدست آورده می‌شوند.

در شکل (پ-۲-ب)، اندازه ولتاژ مرجع و زاویه α با استفاده از ولتاژ سه‌فاز مرجع تعیین می‌شوند. برای تعیین شماره سکتور، باید رنج زاویه α بین 0 و 2π باشد.

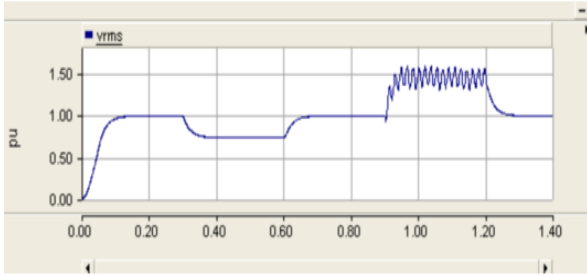
شکل (پ-۲-ج)، برای محاسبه زمان دو بردار مجاور فعال (T_1, T_2) و بردار صفر (T_0) طراحی شده است.

شکل (پ-۲-د)، برای محاسبه سیکل کاری سوئیچ‌ها و تولید سیگنال‌های مدولاسیون طراحی شده است. در این شکل همچنین سیگنال‌های حامل با سیگنال‌های مدولاسیون مقایسه می‌شوند و پالس‌ها تولید می‌شوند.

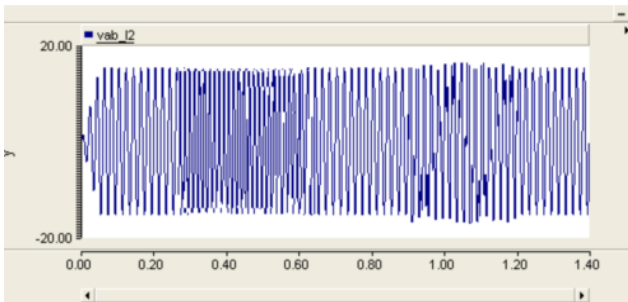
۴-۶ نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد D-STATCOM، یک بار اهمی - سلفی به شین ۲ اتصال می‌یابد و یک بانک خازنی سه‌فاز به شین ۱ متصل می‌شود. طی شبیه‌سازی در دوره $300-600$ ms، S_1 بسته است و در دوره $900-1200$ ms، S_2 بسته است.

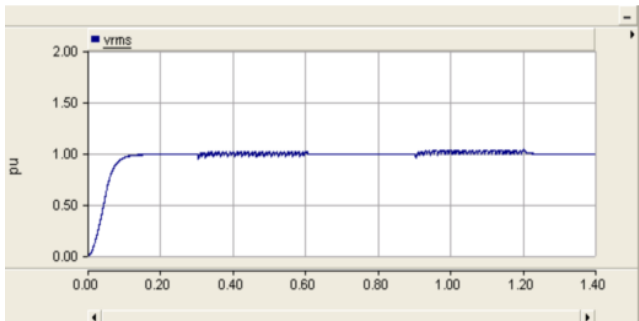
در اینجا بمنظور اهداف مقایسه‌ای بین D-STATCOM مبتنی بر SVPWM و D-STATCOM مبتنی بر SPWM هیچ فیلتری در نظر گرفته نشده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۶) تا (۲۳) نشان داده شده است.



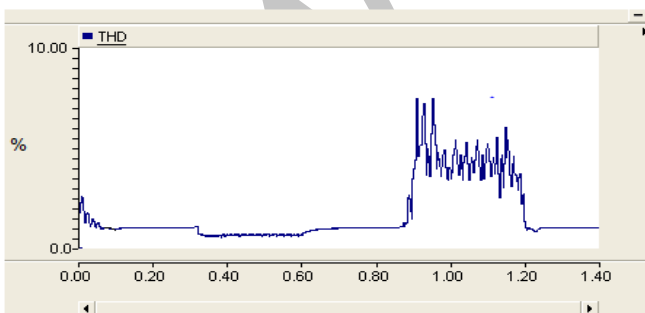
شکل (۱۷): مقدار مؤثر ولتاژ بار در اثر کمبود و بیشبود ولتاژ بدون حضور D-STATCOM



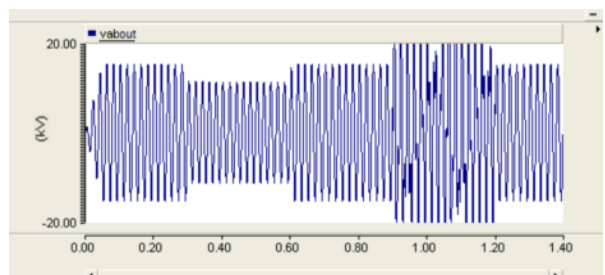
شکل (۱۸): ولتاژ بار در اثر کمبود و بیشبود ولتاژ سه‌فاز با حضور D-STATCOM مبتنی بر SPWM



شکل (۱۹): مقدار مؤثر ولتاژ بار در اثر کمبود و بیشبود ولتاژ با حضور D-STATCOM مبتنی بر SPWM



شکل (۲۰): THD شین بار در هنگام جبران‌سازی کمبود و بیشبود سه‌فاز توسط D-STATCOM مبتنی بر SPWM



شکل (۱۶): ولتاژ بار در اثر کمبود و بیشبود ولتاژ سه‌فاز بدون حضور STATCOM

گردید و نتایج عملکرد D-STATCOM مبتنی بر هر کدام از مدولاسیونها با هم مقایسه گردید. هر دو تکنیک، ولتاژ بار را در هنگام خطا بازیابی می‌کنند اما مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی یک توالی سوئیچ‌زنی ویژه برای کلیدهای قدرت اینورتر سه‌فاز سه‌فاز می‌برد و اعوجاج هارمونیکی کمتری در ولتاژهای خروجی یا جریان‌های خروجی نسبت به مدولاسیون پهنای پالس سینوسی تولید می‌کند و بطور مؤثرتری ولتاژ بار را بازیابی می‌کند.

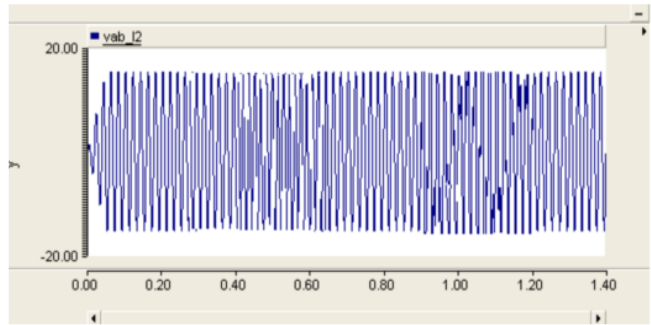
پیوست‌ها:

جدول (پ-۱): مشخصات اجزاء و بارهای شبکه نمونه

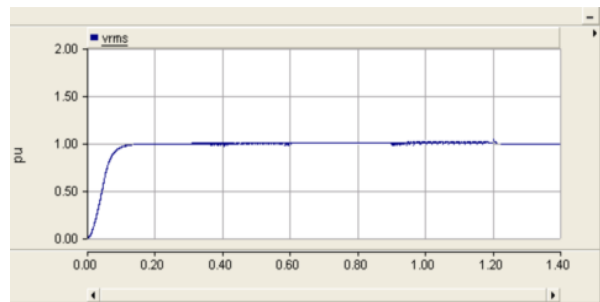
| مشخصات اجزای شبکه | اجزا و پارامترهای شبکه |
|-----------------------------|-----------------------------|
| ۲۳۰ KV و ۵۰ Hz | ولتاژ و فرکانس شبکه |
| ۱/۷۵۵ j | امپدانس خط از شبکه تا شین ۱ |
| ۲۳۰۱۱۱۱۱ KV و $u_k = 10\%$ | ترانسفورماتور T1 |
| سه سیم‌پیچ Y/Y/Y زمین شده | اتصال ترانسفورماتور T1 |
| ۰/۰۱+۰/۰۵ j | امپدانس خط ۱ |
| ۰/۰۵+۰/۴۵ j | امپدانس خط ۲ |
| ۱۲/۱+۱۹/۲۶ j | بار ۱ |
| ۰/۰۵+۰/۰۵۹ j | بار ۲ |
| سه خازن ۳ μF ستاره زمین شده | بار ۳ (بانک خازنی) |

جدول (پ-۲): مشخصات و مقادیر اجزای مختلف D-STATCOM

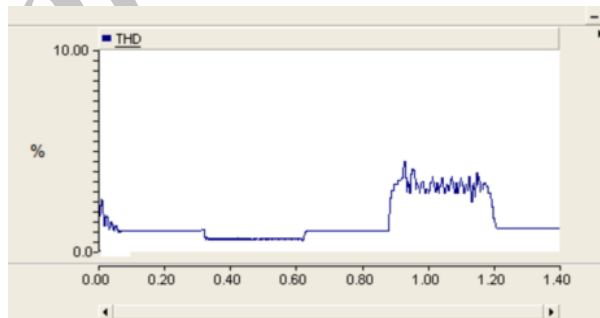
| مشخصات اجزای D-STATCOM | اجزای D-STATCOM |
|------------------------|------------------------|
| ۱۹ KV | ظرفیت منبع DC |
| ۷۵۰ μF | خازن DC |
| GTO | نوع سوئیچ‌های قدرت VSI |
| ۴۵۰ Hz | فرکانس کلیدزنی |
| اینورتر پل سه‌فاز سطحی | نوع اینورتر |



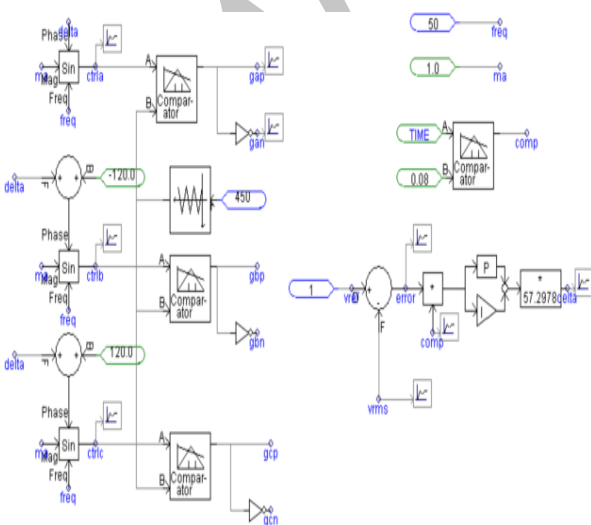
شکل (۲۱): ولتاژ بار در اثر کمبود و بیشبود ولتاژ سه‌فاز با حضور SVPWM مبتنی بر D-STATCOM



شکل (۲۲): مقدار مؤثر ولتاژ بار در اثر کمبود و بیشبود ولتاژ با حضور SVPWM مبتنی بر D-STATCOM



شکل (۲۳): THD شین بار در هنگام جبران‌سازی کمبود و بیشبود سه‌فاز توسط D-STATCOM مبتنی بر SVPWM

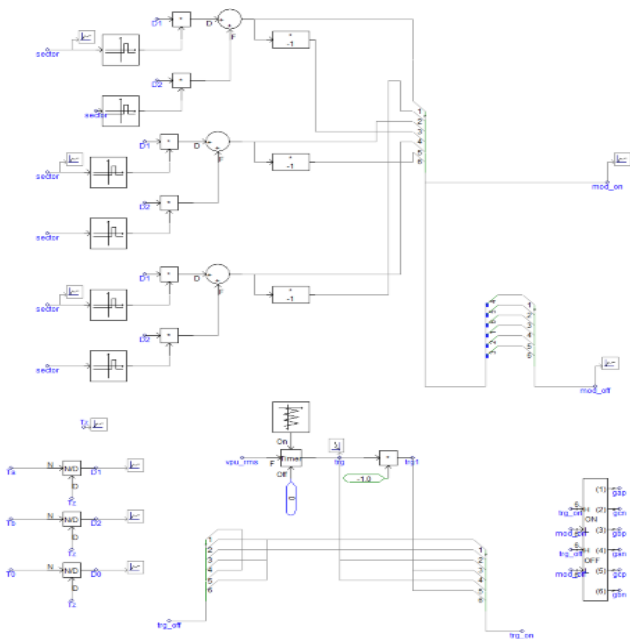


شکل (پ-۱): سیستم کنترل D-STATCOM مبتنی بر SVPWM

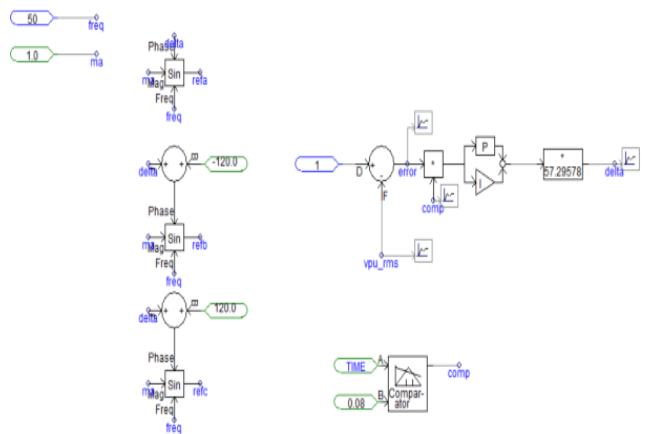
از مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی قابل مشاهده است که هم D-STATCOM مبتنی بر تکنیک SPWM و هم D-STATCOM مبتنی بر تکنیک SVPWM قادر به تنظیم ولتاژ بار در هنگام کمبود و بیشبود ولتاژ می‌باشند و ولتاژ بار را بازیابی می‌کنند، با این تفاوت که D-STATCOM مبتنی بر SVPWM بطور مؤثرتری ولتاژ بار را بازیابی می‌کند و اعوجاج هارمونیکی کل تولید شده در شین بار در هنگام جبران‌سازی کمبود و بیشبود ولتاژ توسط D-STATCOM مبتنی بر SVPWM کمتر است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد D-STATCOM در برابر کمبود و بیشبود ولتاژ با استفاده از مدولاسیون پهنای پالس سینوسی و مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی توسط نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی



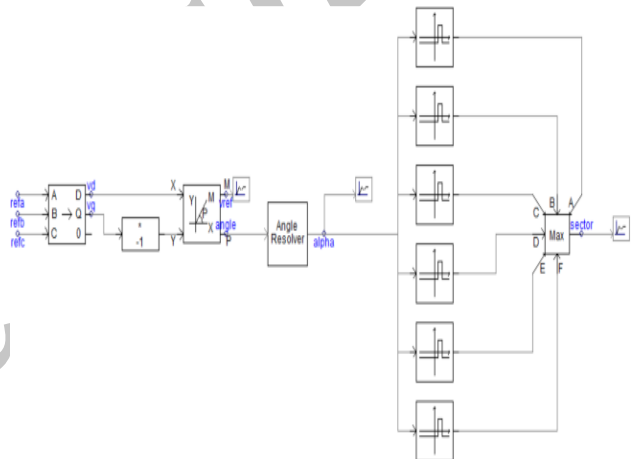
شکل (۱۷-د): محاسبه سیکل کاری سوئیچ‌ها و تولید سیگنال‌های مدولاسیون



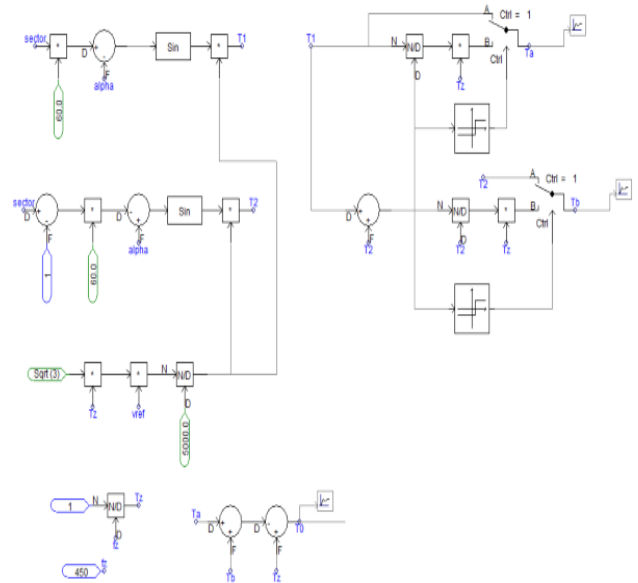
شکل (۱۷-الف): محاسبه اندازه کمبود و بیشبود ولتاژ و تولید سیگنال مرجع

مراجع

- [1] Omar, R., Abdrahim, N., "Mitigation Of Voltage Sags/Swells Using Dynamic Voltage Restorer (DVR)", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Asian Research Publishing Network, Vol. 4, No. 4. 2009
- [2] Bayindir, K., "Modeling Of Custom Power Devices", Ph.D Thesis, University Of Çukurova , Department Of Electrical And Electronics Engineering, 2006.
- [3] O. Anaya-Lara, E. Acha, "Modeling and analysis of custom power systems by PSCAD/EMTDC", *IEEE Trans*, Vol. 17, No. 1, pp.266-272, January 2002.
- [4] Ashwin Kumar Sahoo T. Thyagarajan, " Modeling of Facts and Custom Power Devices in Distribution Improve Power Quality "Third International Conference on Power Systems, Kharagpur, INDIA December,2009
- [5] XiangQian, T., Keqing, X. , Ming, SH., Xianhong, MA., "Reactive Power and Unbalance Compensation with DSTATCOM", IEEE
- [6] Jeon, Y.S., Kwak, N.H., Choo, J.B, 2005," Analysis of Voltage Regulation by D-STATCOM Using the EMTDC Program", *Journal of Power Electronics*, Vol. 5, No. 4.
- [7] Keliang Zhou and Danwei Wang " Relationship Between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM " *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 1, February 2002.
- [8] Khalid, A.KH., Bhutto, GH.M," Optimal use of energy storage for series connected voltage source converter", Master of Science Thesis in the Master Degree Programme, Electric Power Engineering, Sweden, 2010.
- [9] Vasudevanaidu, P., Narendra, Y.," A New Simple Modeling and Analysis of Custom Power controllers", Third International Conference on Power Systems, Kharagpur, India, 2009.
- [10] S.V Ravi Kumarand S. Siva Nagaraju " Simulation Of D-STATCOM And DVR In Power Systems "Arpn Journal Of Engineering And Sciences, Vol. 2, June 2007.
- [11] Jung, J.W," Project Space Vector PWM Inverter", Mechatronic Systems Laboratory Department of Electrical



شکل (۱۷-ب): محاسبه اندازه ولتاژ مرجع V_{ref} و زاویه α و تعیین سکتور



شکل (۱۷-ج): محاسبه زمان دو بردار مجاور فعال و بردارهای صفر

(۱۳۸۰) سپری کرده است. فعاليت‌های پژوهشی ایشان در زمينه سیستم‌های قدرت، اکترونیک قدرت و بهينه‌سازی فازی می‌باشد.



وحيد خرمشاهی در سال (۱۳۶۱) در شهرستان دزفول متولد شد. تحصيلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۸۳)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه شاهد (۱۳۸۷) سپری کرده است و در حال حاضر مربي گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می‌باشد.

زیر نویس‌ها

- 1 - Distribution Static Synchronous Compensator
- 2 - Sinusoidal Pulse Width Modulation
- 3 - Space Vector Pulse Width Modulation
- 4 - Voltage Sag
- 5 - Voltage Swell
- 6 - Voltage Source Converter
- 7 - Pulse Width Modulation
- 8 - Total Harmonic Distortion
- 9 - Flywheel Energy Storage Systems
- 10 - Superconducting Magnetic Energy Storage
- 11 - Gate Turn-Off Thyristors
- 12 - Insulated Gate Bipolar Transistors
- 13 - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors
- 14 - Integrated Gate Commutated Thyristors

- And Computer Engineering The Ohio State University, 2005.
- [12] Keyhani, K., "Pulse-Width Modulation (PWM) Techniques "Department of Electrical and Computer Engineering The Ohio State University.
- [13] Masood.Ch, T., Edris, A.A., Aggarwal, R., "Space Vector (PWM) Digital Control and Sine (PWM) Pulse Width Modulation modelling, simulations Techniques & Analysis by MATLAB and PSIM (Powersys)", University of Engineering & Technology Lahore Pakistan.
- [14] K. Vinoth Kumar, Prawin Angel Michael, Joseph P. John and Dr. S. Suresh Kumar "Simulation and Comparison of SPWM and SVPWM Control For Three Phase Inverter" School of Electrical Sciences, Karunya University, Coimbatore, Tamilnadu, India ARPN Journal of Engineering, JULY 2010
- [15] Gajdusek, P., " Programable Laboratory Invertor And Space Vector PWM", Doctoral Degree Programme (2) Dept. of Electrical Power Engineering, FEEC, VUT.

رزومه



حسن برانی در سال (۱۳۴۸) در شهرستان دزفول متولد شد. تحصيلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۷۱)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تبریز (۱۳۷۵) و دکترای مهندسی برق- قدرت از واحد علوم و تحقيقات تهران (۱۳۸۶) سپری کرده است. فعاليت‌های پژوهشی ایشان در زمينه تجديد ساختار در صنعت برق، ادوات FACTS، قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت می باشد و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می‌باشد.

حمید کریمی در سال (۱۳۶۲) در شهرستان کازرون متولد شد. تحصيلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون (۱۳۸۵)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۹۰) سپری کرده است. فعاليت‌های پژوهشی ایشان در زمينه ادوات FACTS، کیفیت توان و الکترونیک قدرت می‌باشد.



علیرضا سیفی در سال (۱۳۴۷) شهرستان شیراز متولد شد. تحصيلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه شیراز (۱۳۷۰)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تبریز (۱۳۷۲) و دکترای مهندسی برق- قدرت از دانشگاه تربیت مدرس