



تحلیل و بررسی هارمونیکی بین عملکرد دو مبدل ۱۲ پالسه و ۶ پالسه در سیستم های HVDC

پرستو عزیزیان اصفهانی^۱ غضنفر شاهقلیان^۲ مهرداد جعفربلند^۳

۱ دانشکده برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد – parastooazizyan@gmail.com
۲ دانشکده برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد – shahgholian@iaun.ac.ir
۳ دانشکده برق دانشگاه صنعتی مالک اشتر – j_mehrdad405@hotmail.com

چکیده: فن آوری انتقال توان توسط خطوط ولتاژ بالای جریان مستقیم HVDC دارای ویژگی هایی است که آن را در سیستم های انتقال، کاربردی کرده است و مطالعه روی مشخصه های هارمونیکی سیستم انتقال HVDC به منظور تجزیه و تحلیل تاثیر هارمونیک ها روی شبکه اصلی و تلفات ناشی از آن و عملکرد تاسیسات الکتریکی مهم می باشد. در این مقاله بررسی کلی و دلایل منطقی جهت انتخاب فن آوری HVDC و توصیف دو ساختار متداول ۶ و ۱۲ پالسه از آن ارائه شده است. این مقاله بطور خاص تر به تحلیلهای هارمونیکی این دو ساختار پرداخته، آنگونه که با بررسی هارمونیکیهای جریانی و ولتاژی که به شبکه تزریق میشود، مقایسه ای را بین دو سیستم مذکور به نمایش گذاشته است. همچنین در این مقاله به بررسی ریبیل جریان لینک DC پرداخته شده است که در نتیجه آن میتوان از نظر کیفی نویز صوتی ایجاد شده در مبدل های مربوطه را نیز مقایسه کرد. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده در شبیه سازی از طریق نرم افزار مطلب، سیستم HVDC با مبدل ۱۲ پالسه علی رغم هزینه بالاتر، دارای مزایای قابل توجه جهت پیاده سازی آن میباشد، که این مطلب در انتقال توانهای بالاتر، بیشتر خود را نشان میدهد.

واژه های کلیدی: مشخصه هارمونیک، سیستم انتقال HVDC، کنترل کننده PLL، مبدل ۱۲ پالسه.

۴ مقدمه

های اخیر این فناوری مورد توجه زیادی قرار گرفته و تعداد پروژه های HVDC که در حال انجام می باشند، افزایش یافته است [2].

اگر چه منطق اساسی برای انتخاب HVDC اغلب اقتصادی

است ولی ممکن است به دلایل دیگر نیز انتخاب شود :

الف در جایی که کابل های زیر دریایی طولانی تر از ۳۰ کیلومتر لازم باشد.

در این مورد بعلاظرفیت خازنی زیاد کابل، که نیازمند پست های واسطه ی جبران سازی است، استفاده از انتقال به صورت جریان متناوب عملی نیست.

توسعه ی صنعتی هر کشوری ارتباط مستقیمی با تولید و مصرف انرژی خصوصا انرژی الکتریکی دارد. در کشورهای در حال توسعه همانند ایران مصرف انرژی الکتریکی سریعتر افزایش می یابد و بنابراین تاسیس نیروگاه های جدید را ایجاب می نماید و به علت ملاحظات زیست محیطی همانند آلودگی آب و هوا، نیروگاه های بزرگ برق معمولا در مناطق دور از شهر ها ساخته می شوند. استفاده از سیستم انتقال HVDC به طور گسترده به عنوان یک مزیت برای مسافت های طولانی به رسمیت شناخته شده است [1]. در سال



سیستم HVDC عموماً از چند قسمت اصلی تشکیل شده اند: اینورتر و یکسوکننده ی سیستم ac، اینورتر و یکسو کننده ی سیستم dc، فیلترهای سمت شبکه ac، سیستم کنترل زاویه آتش و در نهایت اینورتر و یکسو کننده ی PLLها[6].

۴-۴ مبدل HVDC

در گذشته مبدل های HVDC از یکسوکننده های قوس جیوه که غیر قابل اطمینان بودند، برای انجام یکسوسازی استفاده می کردند و هنوز هم استفاده از این یکسوسازها در برخی مبدل های قدیمی ادامه دارد. از درگاه های تیریس توری اولین بار در دهه ۱۹۶۰ برای یکسو سازی استفاده شد. امروزه از ترانزیستور دو قطبی گیت عایق شده (IGBT) که نوعی تریس تور است نیز برای یکسو سازی استفاده می شود [7]. این قطعه دارای قابلیت های بهتری از تریس تورهای عادی است و کنترل آن آسانتر است که این قابلیت ها موجب کاهش یافتن قیمت تمام شده یک درگاه می شود. از آنجایی که ولتاژ استفاده شده در سیستم HVDC در بسیاری موارد از ولتاژ شکست انواع نیمه هادی ها بیشتر است، برای ساخت مبدل های HVDC از تعداد زیادی قطعات نیمه هادی به صورت سری استفاده می کنند. عنصر کاملاً کنترل شده را بدون توجه به اجزای تشکیل دهنده، «درگاه» (valve) می نامند [7,8].

۴-۴ اینورتر و یکسو کننده های HVDC

یکسوسازها و اینورترها اساساً یک مکانیزم را دارا هستند. بسیاری از پست های برق مربوطه بگونه ای ساخته شده اند تا بتوانند هم به صورت یکسوساز و هم به صورت اینورتر عمل کنند. این سوئیچ ها عموماً در سر جریان متناوب یک دسته از ترانسفورماتورها قرار داده می شوند، که اغلب سه ترانسفورماتور تک فاز جدا از هم هستند که بصورت یک ساختار سه فاز ستاره زمین شده اولیه و مثلث ثانویه، ایستگاه مورد نظر را از تغذیه جریان متناوب جدا می کنند تا بتوانند یک زمین محلی را ایجاد کنند و نیز تا یک ولتاژ مستقیم نهایی صحیح را تضمین کنند.

سپس خروجی این سه ترانسفورماتور به یک پل یکسوساز شامل تعدادی درگاه وصل می شود. عموماً ساختار اصلی

ب در جایی که ارتباط هماهنگ بین دو سیستم نیاز باشد، استفاده از خطوط جریان متناوب عملی نیست.

ج در جایی که انتقال مقادیر زیاد توان در مسافت های طولانی به وسیله خطوط هوایی نیاز باشد.

در مسافت های بالاتر از ۶۰۰ کیلو متر، انتقال HVDC رقیبی برای انتقال جریان متناوب به شمار می رود. با توجه به اینکه مقادیر زیادی در زمینه HVDC ارائه شده است اما کمتر به تحلیل های هارمونیک جریان و ولتاژ در شبکه قدرت و همچنین ریپل جریان DC پرداخته شده است [1,2]. همانگونه که در مقالات متعددی نیز اشاره شده است وجود منابع هارمونیک، یکی از اصلی ترین معضلات شبکه قدرت می باشد که دارای اثرات منفی مانند افزایش اتلاف، گرما، نویز و لرزش می باشد. که یکی از این منابع تولید هارمونیکها، مبدل های خطوط HVDC میباشند. در مقاله [3] به بررسی اثر هارمونیک ناشی از سوئیچ زنی در جریان خط DC پرداخته شده و در مقاله دیگری [4] تحلیل هارمونیک ولتاژ و جریان با مبدل ۶ پالسه البته با یک نوع فیلتر خاص بیان شده است. در مقاله [5] تنها تحلیل هارمونیک سیستم HVDC با مبدل ۶ پالسه و در سمت ac توضیح داده شده است. در این مقاله به بررسی هارمونیک سیگنال های جریان و ولتاژ سمت شبکه قدرت در حضور خط انتقال HVDC پرداخته می شود و همچنین مسئله ریپل جریان تولیدی در خط HVDC به واسطه ی استفاده از دو الگوی مرسوم ۶ پالسه و ۱۲ پالسه برای خط انتقال HVDC مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش دوم به توصیف کلی مدل HVDC و الگوهای ساختاری مبدل های شبکه می پردازیم و شبکه مورد مطالعه را معرفی می کنیم. در قسمت سوم بررسی هارمونیک HVDC بیان می شود و در انتها نتیجه گیری ارائه می شود.

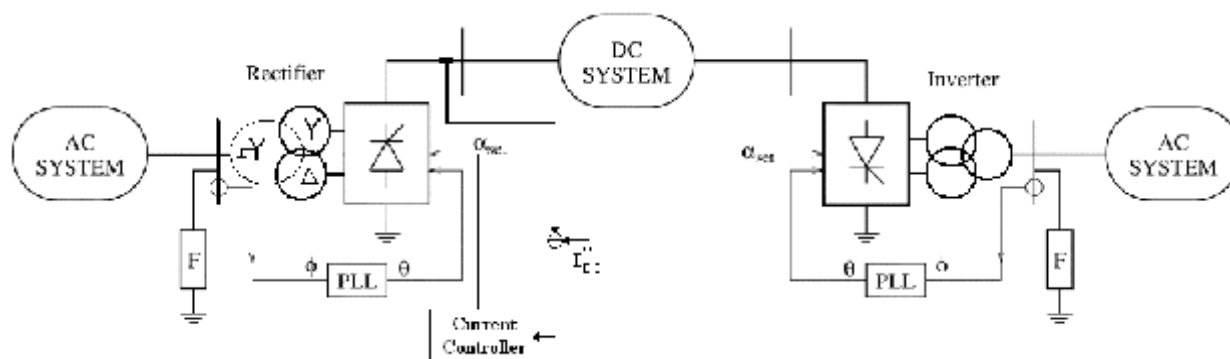
۴ توصیف کلی مدل HVDC

ساختار مدل سیستم انتقال HVDC با مبدل ۱۲ پالسه در شکل ۱ نشان داده شده است. یکی از روشهای مدل کردن سیستمهای قدرت جهت بررسی سیگنال کوچک، استفاده از مدل خطی شده می باشد. کما اینکه تحلیلها را میتوان در نرم افزارهایی چون مطلب بطور سیمولینکی نیز انجام داد.



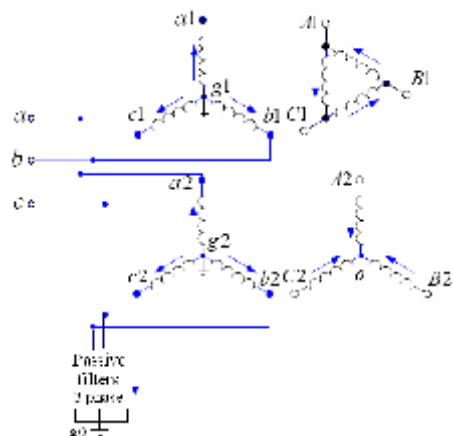
های این ولتاژ هم قابل ملاحظه اند (شکل ۶ (ب)). یک ساختار بهبود یافته این سیستم از ۱۲ درگاه استفاده می کند. در این سیستم جریان متناوب وارد دو ساختار متفاوت

شامل شش درگاه است که هر سه درگاه، هر سه فاز را به یکی از دو سر ولتاژ مستقیم وصل می کند. اما به هر حال در این سیستم، به دلیل اینکه هر ۶۰ درجه یک تغییر فاز داریم یا به عبارتی یک ولتاژ شش پالسه داریم، هارمونیک



شکل (۱): مدل سیستم انتقال HVDC با مبدل ۱۲ پالسه

۴-۴ مشخصه ی هارمونیک ترانسفورماتور مبدل ۱۲ پالسه و فیلتر پسیو



شکل (۲): توزیع هارمونیک ترانسفورماتور مبدل مرسوم و سیستم فیلتر پسیو ac

از ترانسهای سه فاز می شود: ترانسفورماتور سه فاز با ساختار ستاره سمت اینورتر و ستاره زمین شده سمت شبکه و دسته ترانسفورماتورهای دوم بصورت مثلث سمت اینورتر و ستاره زمین شده سمت شبکه شکل ۱. در این صورت شکل موج خروجی این دو ترانسفورماتور سه فاز با هم ۳۰ درجه اختلاف فاز خواهد داشت (شکل ۶ (الف)). حال ۱۲ درگاهی که داریم هر یک از این دو دسته سه فاز را به ولتاژ مستقیم وصل می کنند و در این صورت هر ۳۰ درجه یک تبدیل فاز خواهیم داشت، یا یک ولتاژ ۱۲ پالسه خواهیم داشت که این به معنی کاهش قابل ملاحظه ی هارمونیک ها است. علاوه بر تغییر دادن ترانسفورماتورها و درگاه ها، می توان توسط اجزا راکتیو، پسیو و مقاومتی مختلفی برای حذف هارمونیک های موجود بر روی ولتاژ مستقیم استفاده کرد [3,8].

در شکل (۲) توزیع هارمونیک ترانسفورماتور مبدل ۱۲ پالسه و سیستم فیلتر پسیو ac نشان داده شده است. که در آن، فلش نشان دهنده ی مسیر شار تمام جریان های هارمونیک تولید شده توسط مبدل پل است. جریان های هارمونیک در سیم پیچ های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور مبدل ۱۲ پالسه بر حسب آمپر دور می باشد.



ac همزمان است. این خروجی برای تعریف مرجع متصل با هر یک از ترستورهای مبدل بکار می رود و تضمین می کند که لحظه های آتش با ولتاژ ac همزمان شوند. سیستم PLL مدلسازی شده از نوع DQZ، دارای سه مولفه اصلی: محاسبه گر سیگنال خطا، کنترلر PI و اسیلاتور کنترل کننده ی ولتاژ (VCO)، می باشد. سیگنال خطا به عنوان مولفه ی q ولتاژ ac، با توجه به نمونه ی زاویه مرجع خروجی PLL محاسبه می شود. این سیگنال که در نمونه ی سیگنال کوچک، متناسب با اختلاف فاز بین ولتاژ ac و موج خروجی می باشد، برای کاهش یا افزایش سرعت VCO به کار می رود تا اینکه مولفه ی q و در نتیجه اختلاف فاز بین ولتاژ ac و خروجی PLL صفر شود.

نمودار بلوک دیاگرام این کنترل کننده در شکل (۳) آمده است [4,6].

تابع انتقال حلقه باز شامل بهره K که مولفه نقطه کار ولتاژ ac می باشد، یک کنترلر PI و یک انتگرال گیر که عمل VCO را نشان می دهد، می باشد. کنترل کننده انتگرال گیر مورد نیاز است، چرا که PLL می تواند تغییرات در فرکانس ولتاژ خط ac را با خطای حالت ماندگار صفر، ردگیری کند. قابل توجه است که مدل PLL اهمیت خاصی دارد به خصوص در اینورتر که ناپایداری در فرکانس پایین افزایش می یابد، البته زمانی که اینورتر سیستم ac، SCR سرعت پایین باشد [5,9,10].

۴ بررسی هارمونیک

سیستم انتقالی HVDC در محیط مطلب شبیه سازی شد [6,11,12,13]. در شکل (۳ الف) نمودار تحلیل هارمونیک Van در سمت ac برای سیستم HVDC که با مبدل ۱۲ پالسه کار می کند، آمده است. و با مقایسه آن با شکل (۳ ب) که تحلیل هارمونیک برای همان شبکه است، فقط با این تفاوت که این بار از مبدل ۶ پالسه به جای ۱۲ پالسه در مدار استفاده شده است، به این نتیجه می رسیم که مقدار هارمونیک با استفاده از مبدل ۱۲ پالسه به جای ۶ پالسه به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. و کاهش هارمونیک، کاهش تلفات هارمونیک را باعث می شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} W_2 \dot{I}_{hA1C1} + W_1 \dot{I}_{hg1a1} = 0 \\ W_2 \dot{I}_{hB1A1} + W_1 \dot{I}_{hg1b1} = 0 \\ W_2 \dot{I}_{hC1B1} + W_1 \dot{I}_{hg1c1} = 0 \end{array} \right. \quad (۱)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_2 \dot{I}_{hA2o} + W_1 \dot{I}_{hg2a2} = 0 \\ W_2 \dot{I}_{hB2o} + W_1 \dot{I}_{hg2b2} = 0 \\ W_2 \dot{I}_{hC2o} + W_1 \dot{I}_{hg2c2} = 0 \end{array} \right. \quad (۲)$$

که در آن W_1 و W_2 به ترتیب تعداد چرخش سیم پیچ های اولیه و ثانویه هستند.

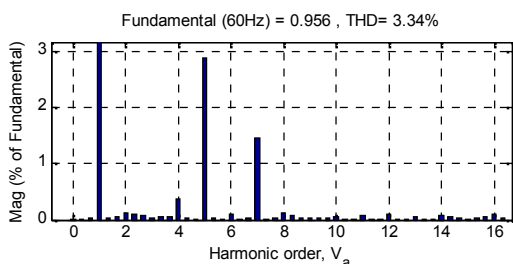
در شرایط ایده آل، جریان های هارمونیک در نقطه ی اتصال سیم پیچ ها ی اولیه و فیلترهای پسیو موازی، قانون کیرشهف را تایید می کنند که این می تواند به صورت معادلات جریان بیان شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{hg1a1} + \dot{I}_{hg2a2} - \dot{I}_{hag0} = 0 \\ \dot{I}_{hg1b1} + \dot{I}_{hg2b2} + \dot{I}_{hbg0} = 0 \\ \dot{I}_{hg1c1} + \dot{I}_{hg2c2} + \dot{I}_{hcg0} = 0 \end{array} \right. \quad (۳)$$

در واقع با توجه به اثرات امپدانسی سیستم، فیلترهای پسیو نمی توانند به نقطه ی کاملاً تنظیم شده برسند. بنابراین مقداری جریان هارمونیک وجود خواهد داشت که طرف شبکه، جریان دارند و این اشکال تکنولوژی فیلتر پسیو است. و در نتیجه مطالعه در نحوه استراتژی های کلید زنی سوئیچ ها از اهمیت خاصی برخوردار است. و از ساختارهایی باید استفاده کرد که ذاتاً هارمونیک کمتری را به شبکه اعمال کنند. و در نتیجه با استفاده از مبدل ۱۲ پالسه می توان فیلترهای ارزانتری طراحی کرد و همچنین هارمونیکهای بیشتری را محدود کنیم.

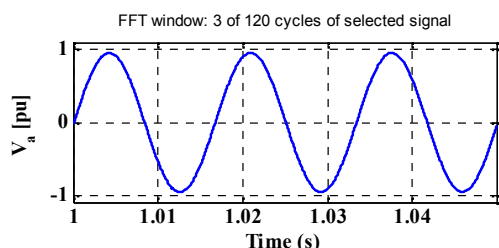
۴-۴ PLL سیستم کنترل فیدبک منفی

PLL سیستم کنترل فیدبک منفی می باشد که تغییرات در زاویه ی مولفه فرکانسی ولتاژ خط مبدل ac را ردیابی می کند. PLL یک تابع مرجع شیب ایجاد می کند که با ولتاژ

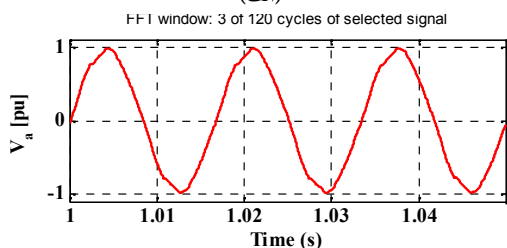


(ب)

شکل ۴: الف: نمودار تحلیل هارمونیک V_{an} در سمت ac برای سیستم HVDC با مبدل ۱۲ پالسه ب: نمودار تحلیل هارمونیک V_{an} در سمت ac برای سیستم HVDC با مبدل ۶ پالسه.

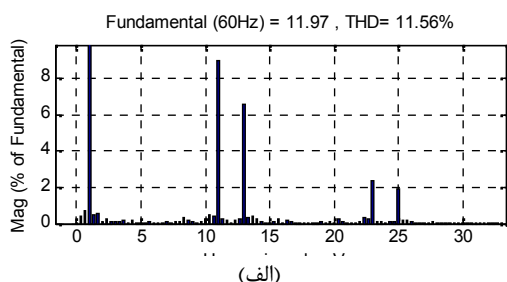


(الف)



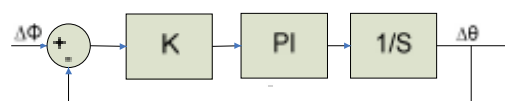
(ب)

شکل ۵: الف: سیگنال انتخابی برای V_{an} ، برای مبدل ۱۲ پالسه ب: سیگنال انتخابی برای V_{an} ، برای مبدل ۶ پالسه



(الف)

و این کاهش تلفات باعث بالا بردن ظرفیت انتقال می شود. همچنین مقدار THD از ۳.۳۴٪ به ۰.۲۳٪ کاهش یافت. همان طور که در شکل ۴ ملاحظه می کنیم سیگنال انتخابی برای V_a با مبدل ۱۲ پالسه به حالت سینوسی نزدیک تر شد و این دلیل خوبی برای کاهش هارمونیک ها نسبت به حالتی است که از مبدل ۶ پالسه استفاده می شود.

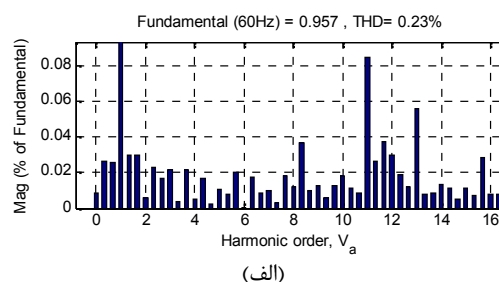


شکل (۳): بلوک دیاگرام PLL.

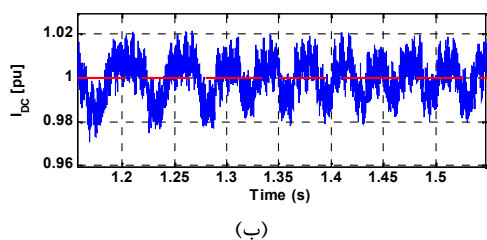
در شکل ۵ الف نمودار تحلیل هارمونیک I_a در سمت ac برای سیستم، زمانی که با مبدل ۱۲ پالسه کار میکند نشان داده شده است. که در قیاس با شکل ۵ ب که همان تحلیل را بیان می کند اما با مبدل ۶ پالسه، کاهش هارمونیک ها و همچنین کاهش THD از میزان ۲۸.۵۸٪ به ۱۱.۹۸٪ را می توان مشاهده نمود.

در شکل (۶) که سیگنال انتخابی I_a می باشد، مشاهده می کنیم که سیگنال انتخابی برای سیستم HVDC که با مبدل ۱۲ پالسه فعال می باشد، دارای شکل متقارن تری می باشد در نتیجه هارمونیک سیستم با مبدل ۱۲ پالسه در مقایسه با سیستم با مبدل ۶ پالسه، کاهش می یابد. در شکل ۷ حالت دائم جریان dc به تصویر کشیده شده است.

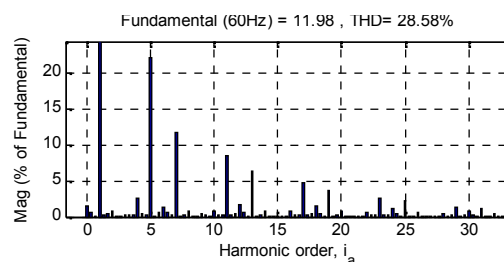
که این جریان در زمانی که از مبدل ۱۲ پالسه به جای ۶ پالسه استفاده شده است دارای دامنه نوسان کوچکتری (مابین ۱.۱ و ۰.۹) می باشد.



(الف)



شکل ۷: حالت دائم جریان dc (خطوط نقطه چین I_{ref} و خطوط دیگر I_{dc} می باشد) الف) سیستم HVDC با مبدل ۱۲ پالسه، ب) سیستم HVDC با مبدل ۶ پالسه



شکل ۵: الف) نمودار تحلیل هارمونیک I_a در سمت ac برای مبدل ۱۲ پالسه، ب) نمودار تحلیل هارمونیک I_a در سمت ac برای مبدل ۶ پالسه.

۴ نتیجه گیری

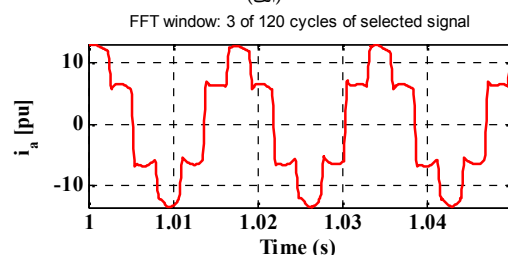
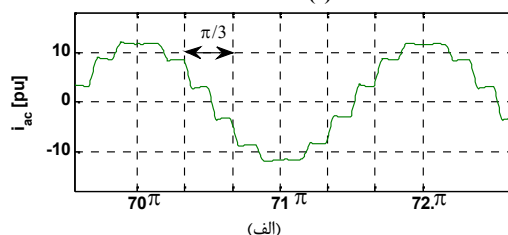
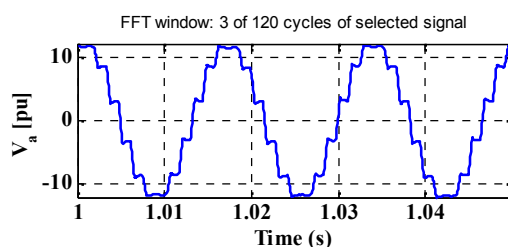
با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی یک شبکه انتقال استاندارد HVDC با دو استراتژی انتقال سیستم ۱۲ پالسه و ۶ پالسه و تحلیل هارمونیک این دو، برای سیگنال های جریان و ولتاژ ac سمت مبدل، مشاهده شد که هارمونیک های تزریقی به شبکه اصلی به طور قابل ملاحظه ای در سیستم ۱۲ پالسه کاهش یافته است.

در بررسی دیگر این مقاله، آنگونه که ذکر شد ریبیل جریان dc خط انتقال HVDC نیز کاهش یافته که خود این مساله نیز باعث خواهد شد که در سمت مبدل dc-ac (سمت دوم شبکه) یک ولتاژ dc صافتری سوئیچ بخورد که در نتیجه باعث کاهش هر چه بیشتر هارمونیک های سمت ناحیه دوم شبکه می شود و این کاهش هارمونیک باعث کاهش تلفات هارمونیک می شود که این باعث بالا رفتن کیفیت توان و افزایش ظرفیت انتقال خواهد شد و استفاده از فیلترهای ارزانتری را نیز به دنبال خواهد داشت.

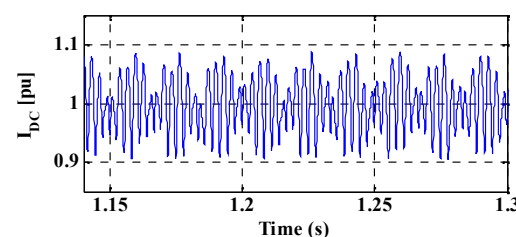
از طرفی کاهش این هارمونیک های ناخواسته باعث کاهش نویز صوتی سوئیچینگ ادوات الکترونیک قدرت (تریستورهای اینورتر و کانورتر) خواهد شد. همچنین برای تنظیم بهتر فیلترها می توان از الگوریتم های بهینه تری مانند الگوریتم ژنتیک استفاده کرد.

مراجع

- [1] Bahrman, M.P., "HVDC Transmission Overview, Transmission and Distribution Conference and Exposition", IEEE PES Transmission and Distribution Conference, April 2008, pp.1-7.
 [2] Jowsick, A.J.M.I., Arulampalam, A., Wijekoon, H.M., "HVDC Transmission line for interconnecting power grids in India and Sri Lanka", in Fourth International Conference



شکل ۶: الف) سیگنال انتخابی برای I_a در سیستم HVCD با مبدل ۱۲ پالسه، ب) سیگنال انتخابی برای I_a در سیستم HVCD با مبدل ۶ پالسه.





on Industr and Information Systems, ICIIS 2009, December 2009, Sri Lanka.

[3]Zhang,H., Wheeler,N ., Grant,D ., "Switching harmonics in the DC link current in a PWM AC-DC-AC converter," in Conf. Rec.30th IEEE IAS Annu. Meeting, 1995, vol. 3, pp. 2649-2655.

[4]Longfu, L., Yong,L., Kazuo,N., Gerhard ,K., Ji, L., Jiazhu,X., and Fusheg,L., " Harmonic Characteristics of New HVDC Transmission System Based on New Converter Transformer", in DRPT2008, April 2008, Nanjing China.

[5]Riedel Peter, "Harmonic Voltage and Current Transfer, and AC-and DC-side Impedances of HVDC Converter", IEEE Trans. Power delivery, VOL. 20, NO. 3, JULY 2005.

[6] Osauskas, C., Wood, A., "Small-Signal Dynamic Modeling of HVDC Systems",IEEE Transaction on power delivery, vol. 18, NO. 1, January 2003.

[7]Li ,Y., Luo ,L., Rehtanz ,C., Member ,S.,"Study on Characteristic Parameters of a New Converter Transformer for HVDC Systems",IEEE Transaction on power delivery,vol. 24, NO. 4, October 2009.

[8] Stretch ,N., Kazerani ,M., ShatShat , R.E., "A Current-Sourced Converter based HVDC Light transmission System," in Proc, IEEE Into Symp. Industrial Electronics, Jul. 2006, vol. 3

[9] Chen, S., Wood, A. R., and Arrillaga, J., "HVDC converter transformer core saturation instability_ A frequency domain analysis ",Proc. Inst. Elect. Eng. Gen.Trans.Dist. vol.143, no. 1, pp.75-81,Jan.1996.

[10] Osauskas, C. M., Hume, D.J., and Wood, A. R. x,"A small signal frequency domain model of an HVDC converter", Proc.Inst. Elect. Eng. Gen. Trans. Dist.,vol.148, no.6, pp. 573-578, Nov.2001

[11]Larsen, E. V., Clark, K., and Lorden, D.J.,"Stability analysis of a digitally based HVDC firing-pulse synchronization control",IEEE Trans. Power delivery,vol. 7, pp.1415-1423, July 1992.

[12]Todd, S., Wood ,A. R., and Bodger, P. S., " An s-domain model of an HVDC Converter", IEEE Trans. Power Delivery, vol.12, pp. 1723-1729, Oct, 1997.

[13] Anderson, B. R., " HVDC transmission-opportunities and challenges ", AC and DC Power Transmission,2006,The 8th IEE International Conference on 28-31 March 2006,pp.24-29.