

افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان سامانه قدرت کشتی‌های نظامی با استفاده از صافی ترکیبی

بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک

سید محسن حسینی^{۱*}، محمدحسین خانزاده^۲، یوسف علی‌نژاد برمی^۳

۱- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان ۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۳- استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۲/۰۴/۰۸، پذیرش: ۹۲/۰۵/۳۰)

چکیده

سامانه قدرت شناورهای نظامی یک سامانه قدرت مستقل با واحدهای تولید، انتقال و بار متمرکز است. وجود انواع بارهای غیرخطی در این سامانه مانند سامانه محرکه کشتی، سامانه کنترل آتش سلاح‌های خودکار، مبدل‌های کلیدزنی و... موجب تزریق جریان‌های هارمونیک به آن گردیده و مشکلات فراوان ایجاد می‌کند. در این مقاله، به کمک شبیه‌سازی بارهای غیرخطی و هارمونیک‌زای موجود در بخش‌های مختلف سامانه قدرت کشتی‌های نظامی، صافی ترکیبی مناسب برای آن طراحی شده است. همچنین برای دستیابی به دو هدف کمینه‌سازی میزان اعوجاج هارمونیک کلی جریان (THD_i) و کاهش هزینه صافی ترکیبی، بهینه‌سازی متغیرهای غیرفعال صافی با کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) انجام شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده تاثیر قابل توجه صافی ترکیبی بهینه در حذف هارمونیک‌های جریان و کاهش اعوجاج هارمونیک کلی جریان (THD_i) از ۴۳/۳۱ درصد به ۴/۱۷ درصد و در نتیجه تحقق استانداردهای هارمونیک‌های نظامی در سامانه قدرت کشتی‌ها است. علاوه بر آن، ضریب توان سامانه از ۶۴/۸ درصد به ۹۷/۶ درصد افزایش یافته است. این تحقیق اهمیت استفاده از صافی‌های هارمونیک‌های را در سیستم‌های قدرت حساس مانند سامانه قدرت کشتی‌های نظامی که دارای محدودیت در ابعاد و وزن و نیازمند قابلیت اطمینان بالا هستند، نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کشتی‌های نظامی، صافی ترکیبی قدرت، جبران‌سازی ضریب توان، بهبود قابلیت اطمینان، بهینه‌سازی الگوریتم‌های ژنتیک، بهینه‌سازی چندهدفه

۱. مقدمه

اضافه بار در مبدل‌های ولتاژ^۱ افزایش دما و تنش‌های گرمایی ایجاد می‌کنند. مبدل‌های تشکیل شده از ادوات نیمه‌هادی به‌عنوان بارهای غیرخطی، مؤلفه‌های توان غیرحقیقی و هارمونیک‌های جریان از منابع AC می‌کشند. در سامانه‌های سه فاز، این مبدل‌ها موجب عدم تعادل و تولید جریان‌های زمین بیش از حد می‌گردند. عواملی چون هارمونیک‌های تزریقی، تولید توان غیرحقیقی، عدم تعادل و جریان زمین بیش از اندازه باعث کاهش راندمان و ضریب توان سامانه می‌شوند.

وجود بارهای الکتریکی هارمونیک‌زا و غیرخطی فراوان در سامانه قدرت کشتی‌های نظامی می‌تواند موجب تزریق جریان‌های هارمونیک به سامانه و کاهش کیفیت توان آن شود. این جریان‌های هارمونیک عامل پیدایش مشکلات زیادی از جمله کاهش ضریب توان، عملکرد نامتعادل، آسیب رساندن به تجهیزات و کاهش راندمان سامانه هستند [۱]. هارمونیک‌های جریان تاثیراتی چون ایجاد افت ولتاژ بر روی عناصر سامانه، عملکرد نادرست تجهیزات الکتریکی حساس و ادوات حفاظتی، تولید تلفات اضافی در سامانه،

1- Voltage Transformers

* رایانامه نویسنده پاسخگو: Sm_hoseini@sun.semnan.ac.ir

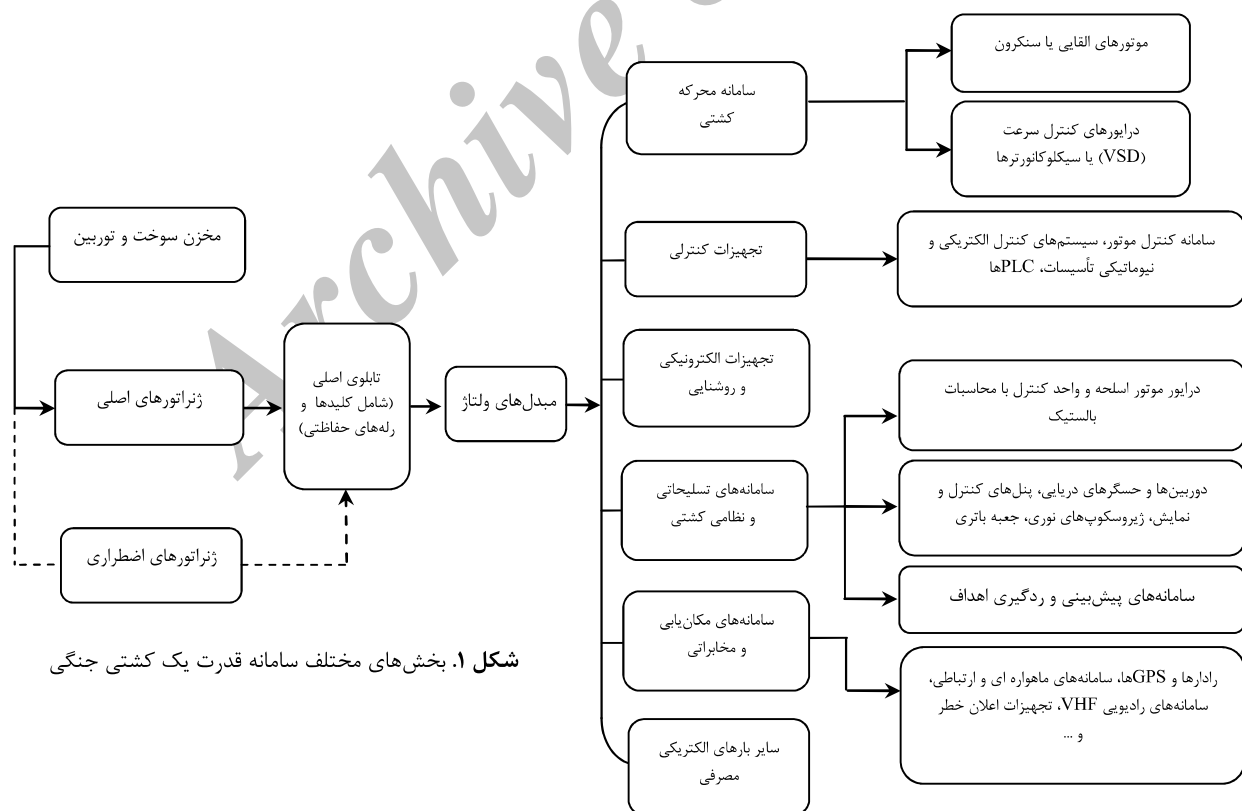
۲. سامانه قدرت کشتی‌های نظامی

سامانه قدرت کشتی‌ها یک سامانه قدرت مستقل است که در مقایسه با سامانه‌های قدرت زمینی، دارای تجهیزات با ظرفیت پایین-تر و مسافت انتقال کوتاه‌تر می‌باشد. ترسیم بلوکی بخش‌های مختلف سامانه قدرت یک کشتی نظامی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

اجزای اصلی این سامانه شامل موتور دیزلی به‌همراه گاورنر، چرخ‌دنده‌های توزیع گشتاور خروجی به بارهای مکانیکی، ژنراتور سنکرون با تحریک‌کننده و کنترل‌کننده ولتاژ و بارهای مصرفی مختلف می‌شود [۵]. سامانه قدرت شناورهای دریایی به‌طور کلی از قسمت‌های تولید، انتقال، تبدیل انرژی الکتریکی و بار تشکیل می‌شود. در بخش تولید از ژنراتورهای مغناطیس دائم گازی یا دیزلی و در بخش انتقال و تبدیل از ادواتی نظیر مبدل‌های ولتاژ، چاپرها و اینورترها برای تبدیل نوع و سطح انرژی جهت کاربردهای مختلف استفاده می‌شود. در شناورهای دریایی، انواع بارهای AC و DC مانند یکسوسازهای دیودی و ترستوری، مبدل‌های کلیدزنی، مبدل‌های بسامدی، سامانه‌های تغذیه تجهیزات رایانه‌ای و کنترلی، مبدل‌های ولتاژ، موتورهای محرک مغناطیس دائم و راه‌اندازهای تنظیم سرعت

این بارها همچنین باعث ایجاد اختلال برای سایر مصرف‌کنندگان و تداخل در سامانه‌های مخابراتی می‌شوند [۲]. به‌دلیل ایجاد مشکلات فراوان، انواع مختلف صافی‌های هارمونیک از جمله صافی‌های فعال^۱ [۱ و ۲]، صافی‌های غیرفعال^۲ [۳] و صافی‌های ترکیبی یا هیبرید^۳ قدرت [۴] به‌عنوان راه‌حل مقابله با هارمونیک‌ها، توجه بسیاری را به‌خود جلب کرده‌اند.

با بررسی منابع موجود، به‌نظر می‌رسد استفاده از صافی ترکیبی با طراحی بهینه، و مزایای قابل توجه حاصل از آن، تاکنون کمتر در سامانه‌های قدرت شناورهای نظامی مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، با در نظر گرفتن مهم‌ترین بارهای هارمونیک موجود در سامانه قدرت کشتی‌های نظامی، صافی ترکیبی مناسب برای سامانه قدرت یک کشتی نظامی نمونه با توان متوسط طراحی شده و شبیه‌سازی آن صورت گرفته است. پارامترهای بخش غیر فعال صافی به-کمک الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA)^۴ بهینه‌سازی شده‌اند. در نهایت مقادیر عددی بهبود در اعوجاج جریان، کاهش تلفات و بهبود ضریب توان ارائه شده‌اند که نتایجی چون کاهش مقادیر نامی تجهیزات الکتریکی، کاهش ابعاد و هزینه‌های سامانه، و افزایش قابلیت اطمینان آن را در پی دارد.



4- Multi-Objective Genetic Algorithm

1- Active Filter
2- Passive Filter
3- Hybrid Filter

الکترومغناطیسی بر وسایل ارتباطی، از جمله پیامدها و مشکلاتی است که عدم جبران‌سازی مناسب هارمونیک‌ها را در شبکه به‌همراه دارد.

این مسائل موجب افزایش تلفات و هزینه‌ها و همچنین کاهش قابلیت اطمینان سامانه قدرت کشتی‌ها می‌شود. این در حالی است که این نوع سامانه نیازمند پایداری و کیفیت توان بالایی بوده و محدودیت‌های زیادی در ابعاد و وزن تجهیزات سامانه قدرت وجود دارد [۷].

۴. مدل‌سازی بارهای هارمونیک در سامانه قدرت کشتی نظامی

مهم‌ترین بارهای الکتریکی هارمونیک‌زا در سامانه قدرت کشتی-های نظامی شامل راه‌اندازها و کنترل‌کننده‌های سامانه محرکه اصلی کشتی، سامانه‌های کنترل سلاح‌های خودکار، مصارف روشنایی، مبدل‌های بسامدی می‌باشند.

۱.۴. سامانه رانش یا نیروی محرکه کشتی

در سامانه محرکه شناورهای دریایی، معمولاً از موتورهای القایی به‌همراه درایورهای کنترل سرعت با تغذیه ولتاژ^۳ و کنترل PWM^۴ استفاده می‌شود.

بیشتر موتورهای القایی موجود در کشتی‌ها از نوع قفس سنجایی، با فرکانس کاری ۶۰ هرتز و ولتاژ ۴۴۰ ولت هستند. پیشرفت‌های اخیر در مبدل‌های الکترونیک قدرت، منجر به افزایش استفاده از این فناوری برای استفاده در درایورهای تنظیم سرعت سامانه محرکه شناورهای دریایی، مانند کشتی‌ها و سکوها نفتی دریایی شده است.

این نوع درایورها از یک منبع ولتاژ DC متصل به اینورتر سه‌فاز تشکیل شده‌اند و فرمان گیت سوئیچ‌ها به کمک مدولاسیون پهنا‌ی پالس کنترل می‌شود [۸]. شکل ۲-الف، یک درایور موتور القایی محرکه کشتی از نوع ۶ پالس و با کنترل PWM را نمایش می‌دهد.

همچنین جریان اعوجاجی تزریق شده به سامانه، و طیف فرکانسی جریان ورودی به درایور کنترل سرعت موتور محرکه و دامنه هارمونیک‌های سوم تا بیست و پنجم به‌ترتیب در شکل‌های ۲-ب و ۲-ج مشاهده می‌شوند.

موتورها، مشاهده می‌شوند [۶]. در شناورهای نظامی، علاوه بر بارهای هارمونیک‌زای ذکر شده، سامانه‌های تسلیحاتی و جنگ‌افزاری مانند سامانه‌های کنترل آتش هوشمند (SGFCS)^۱، سامانه‌های شناسایی اتوماتیک (AIS)^۲، سامانه ردیابی اتوماتیک هدف و غیره وجود دارند که به دلیل به‌کارگیری اینورترها و تجهیزات رایانه‌ای و کنترلی موجب تزریق مؤلفه‌های هارمونیک به سامانه قدرت شناورها می‌شوند.

۳. تأثیرات هارمونیک‌ها بر سامانه قدرت کشتی

در سامانه قدرت کشتی‌های نظامی، عملکرد سامانه نیازمند پایداری و امنیت بالایی است. همچنین به دلیل اهمیت ابعاد، وزن و فضای سامانه، باید راندمان وسایل الکتریکی افزایش یابد تا بتوان از تجهیزاتی با ظرفیت پایین‌تر استفاده نمود.

وجود هارمونیک‌ها به دلیل افزایش در جریان مؤثر سامانه، موجب افزایش تلفات، کاهش ظرفیت انتقال، افزایش حجم و هزینه‌های سامانه قدرت حساس کشتی‌ها می‌گردد. هارمونیک‌ها می‌توانند تأثیرات مخرب فراوانی بر روی تجهیزات سامانه قدرت کشتی‌ها و عملکرد آنها ایجاد نمایند.

آنها می‌توانند موجب بروز تشدید در سامانه قدرت شوند و خاصیت میرایی ممکن است به دلیل وجود هارمونیک‌ها، دچار تغییر شود. همچنین هارمونیک‌ها تأثیرات نامطلوبی بر روی عملکرد ماشین‌های گردان، مبدل‌های ولتاژ و شبکه انتقال دارند. دقت و عملکرد مشخصه‌های اندازه‌گیری شده تجهیزات حفاظتی ممکن است به دلیل وجود هارمونیک‌های نامطلوب تغییر کند.

علاوه بر این، وجود هارمونیک‌ها اثرات نامطلوبی بر روی تجهیزات حساس مصرفی ایجاد می‌نماید. در ماشین‌های الکتریکی موجود، باعث افزایش تلفات در سیم‌پیچی استاتور و مدار روتور، همچنین تأثیر بر روی گشتاور محور ماشین می‌شوند، به این صورت که هارمونیک‌های توالی مثبت گشتاور محور را افزایش داده و باعث افزایش سرعت چرخش آن می‌شوند، در حالی که هارمونیک‌های توالی منفی تأثیر معکوسی دارند و این موضوع، اثر نامطلوبی بر روی پایداری حرکت کشتی‌ها ایجاد می‌کند.

تأثیر بر روی مبدل‌های ولتاژ، افزایش تلفات و کاهش ظرفیت انتقال، تأثیر بر روی تجهیزات اندازه‌گیری، که شامل خطا در اندازه‌گیری و عملکرد تجهیزات اندازه‌گیری و حفاظتی می‌باشد، و همچنین تأثیر به‌صورت تداخلات مخابراتی با تولید نویزهای

3- Voltage-fed Variable Speed Drive (VSD)
4- Pulse Width Modulation

1- Ship Gun Fire Control System
2- Automatic Identification System

۲.۴. سامانه‌های الکتریکی کنترل آتش سلاح

بخش‌های الکتریکی سامانه‌های تسلیحاتی در کشتی‌های رزمی مانند ناوشکن‌ها^۱، فریگیت‌ها^۲، رزم‌ناوها^۳ و غیره شامل واحدهایی همچون واحد کنترل و راه‌انداز موتور اسلحه، صفحه کنترل و نمایش با وضوح یا تفکیک‌پذیری بالا، سامانه‌های رایانه‌ای HMI، ژيروسکوپ نوری، دوربین‌ها و حسگرها، باتری و شارژ کننده‌ها و سامانه‌های پیش‌بینی و ردگیری اهداف می‌باشند. بسیاری از این تجهیزات به دلیل استفاده از ادوات الکترونیک قدرت در ساختار خود موجب تزریق جریان‌های هارمونیک به سامانه می‌شوند. مهم‌ترین واحدهای الکترونیکی تشکیل‌دهنده سامانه سلاح کشتی‌های نظامی که می‌توانند موجب تولید هارمونیک‌های جریان به سامانه قدرت کشتی‌ها شوند، شامل موارد زیر هستند.

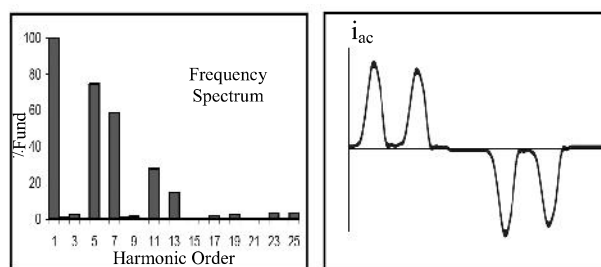
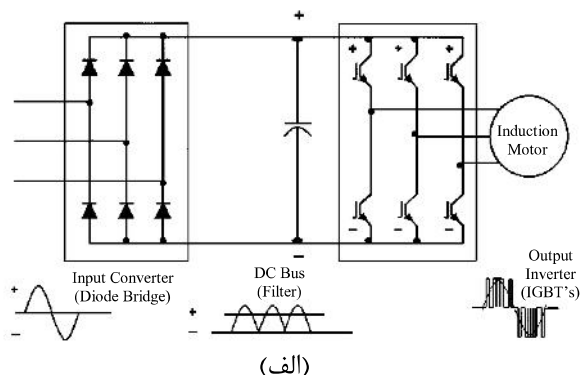
۱.۲.۴. واحد کنترل و درایو موتور (MDCU)

این واحد از مدارهای الکترونیک قدرت برای مهار حرکت موتور سلاح در جهت‌های مختلف، واحد پردازنده دیجیتال با ممیز شناور (Floating-point DSP) و دارای دقت بالا، و همچنین رابط‌های مخابراتی تشکیل می‌شود. واحد معماری سامانه و کنترل، سطح مناسبی از دقت و پایداری را در وضعیت‌های مختلف دریایی و تغییر پارامترهای سامانه مانند اصطکاک، لقی چرخ‌دنده‌ها و غیره فراهم می‌کند.

طراحی واحد کنترل و درایو موتور کاملاً مطابق با پروتکل‌ها و استاندارد نظامی همچون MIL-M-17060 صورت می‌گیرد [۱۱]. استفاده از ادوات نیمه‌هادی مانند ترانزیستورها، دیودها، تریستورها و غیره، برای کنترل و درایو موتور، در این بخش می‌تواند مقدار قابل توجهی هارمونیک به سامانه تزریق نماید.

۲.۲.۴. ژيروسکوپ یا حسگر سرعت زاویه‌ای فیبرنوری

استفاده از ژيروسکوپ‌های فیبر نوری با پایداری بالا و خطای عملکرد پایین، به منظور تشخیص اختلال در وضعیت سامانه حرکت سلاح‌ها به کار می‌رود. این ژيروسکوپ‌ها به صورت تک‌محوری یا دو-محوری بوده و به‌ویژه برای نصب بر روی توپ‌های تحت شوک ناشی از شلیک‌های سنگین طراحی می‌شوند. انکودر یا رمزگذارهای نوری با وضوح و دقت بالا برای تشخیص حرکات زاویه‌ای سامانه سلاح استفاده می‌شود [۱۲].



(ج)

(ب)

شکل ۲. الف) موتور القایی سامانه محرکه با درایور کنترل سرعت ۶ پالسه (ب) جریان هارمونیک تزریقی به شبکه (ج) طیف فرکانسی جریان ورودی VSD [۸]

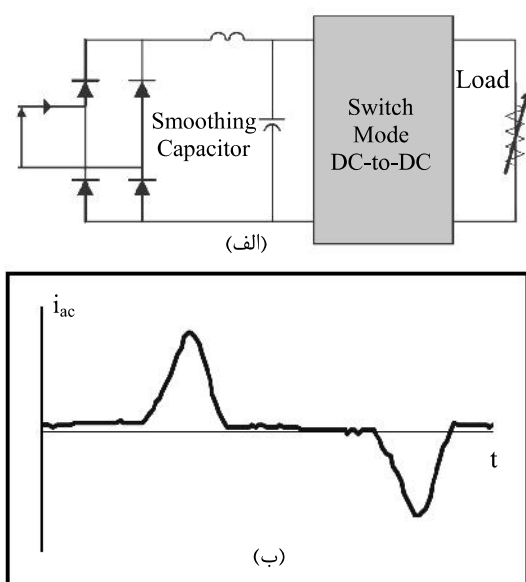
به دلیل تولید هارمونیک‌های ولتاژ و جریان توسط این ادوات و برای حفظ قابلیت اطمینان تجهیزات و به خطر نیفتادن ایمنی خدمه کشتی، استانداردها و محدودیت‌های هارمونیک سختگیرانه‌ای وضع شده است [۹]. به منظور تحقق این استانداردهای هارمونیک، بایستی روش‌های کنترل هارمونیک‌ها در سامانه قدرت مورد استفاده قرار گیرند. درایورهای کنترل سرعت به دلیل دارا بودن یکسوساز ورودی سه‌فاز و وجود جریان‌های پالسی ناپیوسته، مقدار قابل توجهی مؤلفه‌های هارمونیک مرتبه ۵، ۷، ۱۱ و ۱۳ به سامانه قدرت تزریق می‌کنند. معمولاً سطح اعوجاج جریان در این درایورها می‌تواند از ۳۵٪ تا بالای ۸۰٪ باشد [۱۰].

اگرچه سامانه‌های محرکه الکتریکی مزایای قابل توجهی مانند کاهش هزینه‌های حمل و نقل، نیاز کمتر به تعمیرات، کاهش نیروی انسانی مورد نیاز، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، قابلیت مانور بیشتر و افزایش ظرفیت حمل بار را فراهم می‌کند، اما مقدار قابل توجهی هارمونیک‌های ولتاژ و جریان به سامانه جاری می‌کند [۸]. در این تحقیق برای مدل‌سازی سامانه محرکه کشتی، از یک اینورتر سه‌فاز ۶ پالسه متشکل از کلیدهای IGBT و متصل به ولتاژ DC به عنوان مدار درایو کنترل دور موتور القایی قفس سنجایی استفاده شده است.

1- Destroyer
2- Frigate
3- Battleship

۳.۴. سامانه‌های رایانه‌ای و تجهیزات مبتنی بر رایانه‌ها

بخش قابل توجهی از بارهای غیرخطی شامل تجهیزات الکتریکی متشکل از ادوات نیمه‌هادی برای تبدیل نوع و سطح انرژی است (مانند یکسوسازها). برای نمونه، منابع تغذیه کلیدزنی برای تبدیل ولتاژ و جریان AC به DC (SMPS) در رایانه‌ها موجب تزریق هارمونیک‌ها به سامانه قدرت می‌شوند. شکل کلی یک منبع تغذیه کلیدزنی برای تغذیه سامانه‌های رایانه‌ای و سایر مصارف DC در شناورها و شکل موج جریان اعوجاجی کشیده شده از منبع، به- ترتیب در شکل‌های ۴- الف و ۴- ب مشاهده می‌شوند [۸].



شکل ۴. (الف) مبدل کلیدزنی تغذیه با پل یکسوساز دیودی (ب) جریان هارمونیک ورودی به مبدل

۴.۴. مبدل‌های بسامدی AC/AC

مبدل‌های بسامدی^۱ نوع متداولی از درایورهای الکتریکی کنترل سرعت هستند که می‌توانند برای راه‌اندازی موتور محرکه اصلی کشتی مورد استفاده قرار گیرند. بر خلاف سایر انواع درایورهای AC، مانند درایورهای از نوع PWM، که یک طبقه واسطه برای تبدیل AC به DC و سپس تبدیل مجدد DC به AC با دامنه و فرکانس مشخص دارند، سیکلوکانورترها مبدل‌های مستقیم هستند که بدون نیاز به طبقه واسطه، عمل تبدیل فرکانس سیگنال AC را صورت می‌دهند. حداکثر فرکانس خروجی این مبدل‌ها برابر با ۳۳٪ فرکانس ورودی است، که همین امر موجب عدم نیاز به گیربکس برای کاهش سرعت نهایی و همچنین قابلیت کنترل با گشتاور بالا و پاسخ دینامیکی

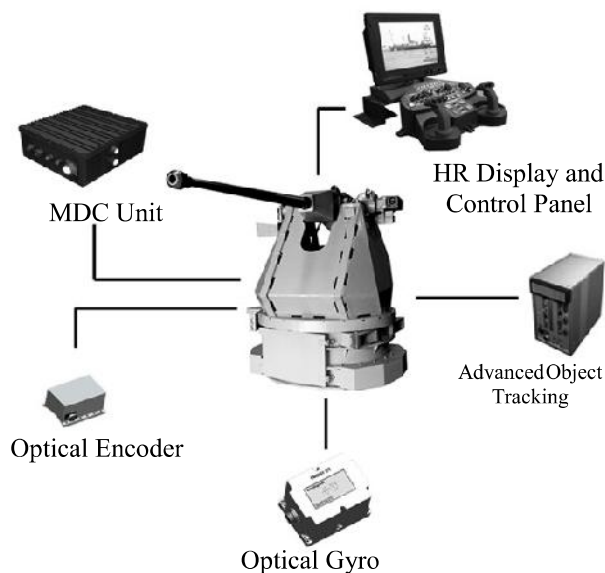
۳.۲.۴. صفحه کنترلی و نمایشگر با قدرت تفکیک پذیری بالا

برای استفاده مناسب از فضای موجود، نمایشگر و صفحه فرمان دستی در دو بخش جداگانه ساخته می‌شوند. اندازه صفحه نمایش LCD بر حسب نیاز و کاربرد مورد نظر سفارش داده می‌شود. این نمایشگرها از جمله تجهیزات الکتریکی هستند که به دلیل نیاز به برق مستقیم و استفاده از تجهیزات نیمه‌هادی، موجب تزریق هارمونیک‌های جریان، به سامانه قدرت کشتی می‌شوند [۱۲].

۴.۲.۴. سامانه پیش‌بینی و ردگیری اهداف

در کشتی‌های نظامی، سامانه‌های پیشرفته ردیابی هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. سامانه ردیابی شامل الگوریتم‌های مبتنی بر طرح و رنگ، الگوریتم‌های پیشرفته برای تشخیص اهداف متحرک، الگوریتم پیش‌بینی و ردیابی و غیره برای افزایش قدرت ردیابی اهداف دشمن و همچنین شامل قابلیت‌های اضافی برای ردیابی اهداف چندگانه دشمن است [۱۲].

با توجه به مطالب عنوان شده، در شکل ۳ قسمت‌های مهم تشکیل‌دهنده سامانه سلاح خودکار کشتی‌های نظامی مشاهده می‌شوند. تمامی بخش‌های ذکر شده فوق، از نیمه‌هادی‌ها به‌منظور یکسوسازی و تامین تغذیه سامانه‌های کنترلی و شارژ باتری‌ها، اینورترهای راه‌انداز موتور و سایر کاربردها تشکیل شده‌اند که موجب تولید هارمونیک‌ها و کاهش کیفیت توان سامانه توزیع قدرت کشتی می‌شوند.

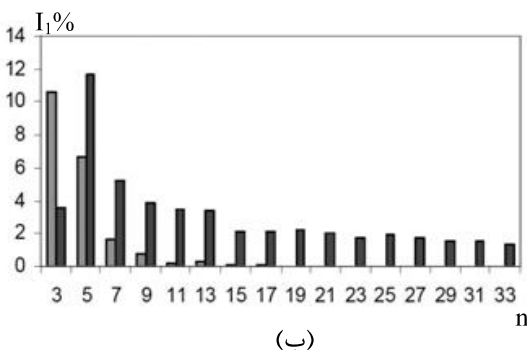
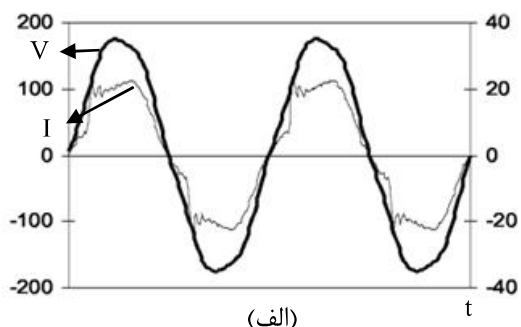


شکل ۳. مهم‌ترین بخش‌های الکترونیکی تشکیل‌دهنده سامانه پیشرفته کنترل آتش سلاح در کشتی‌های نظامی [۱۲]

1- Cycloconverter

۵.۴. مصارف روشنایی

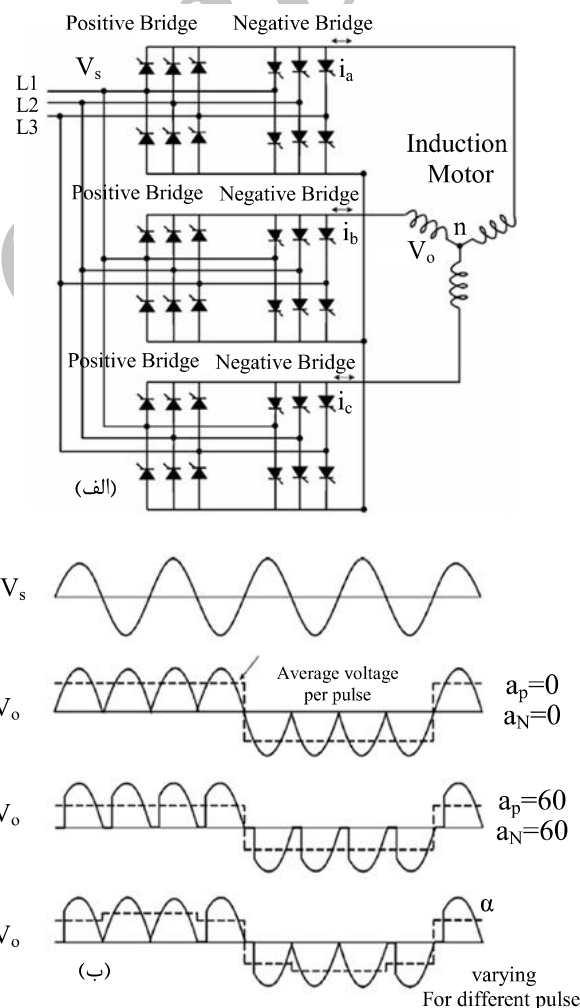
در بخش روشنایی کشتی‌ها، از انواع لامپ‌های رشته‌ای و فلورسنت تخلیه‌ای استفاده می‌شود. لامپ‌های فلورسنت به دلیل اینکه مقدار قابل توجهی جریان هارمونیک مرتبه فرد وارد سامانه توزیع می‌کنند، مانند یک منبع جریان هارمونیک رفتار نموده و از منابع مهم تولید هارمونیک‌ها به‌شمار می‌روند. در این نوع لامپ‌ها، میزان جریان هارمونیک مرتبه سوم به صورت درصدی از جریان اصلی تقریباً برابر با $13/80\%$ ، هارمونیک پنجم $3/49\%$ ، هارمونیک هفتم $2/86\%$ و هارمونیک یازدهم $1/36\%$ است [۱۳]. اعوجاج هارمونیک کلی جریان (THD_I) و طیف هارمونیک لامپ‌های فلورسنت به نوع بالاست^۱ مورد استفاده برای آنها بستگی دارد. دو نوع بالاست ممکن برای لامپ‌های فلورسنت و فلورسنت فشرده (کم مصرف)، شامل بالاست مغناطیسی و بالاست الکترونیکی است. میزان اعوجاج هارمونیک کلی جریان برای بالاست مغناطیسی و الکترونیکی به ترتیب برابر با $13/9\%$ و $17/2\%$ است [۸]. شکل موج نمونه جریان لامپ فلورسنت با بالاست الکترونیکی و طیف فرکانسی هارمونیک برای هر دو نوع بالاست به ترتیب در شکل‌های ۶- الف و ب مشاهده می‌شوند.



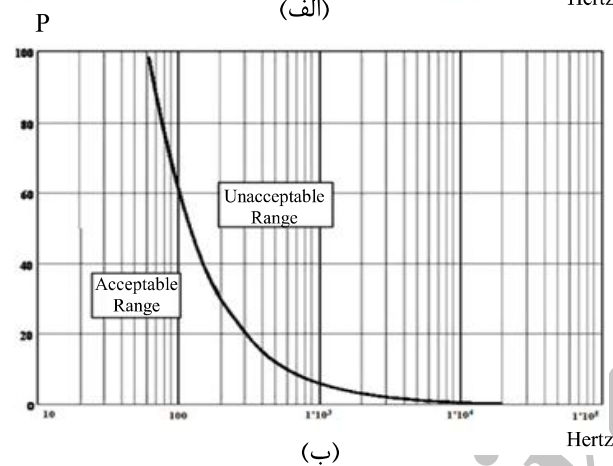
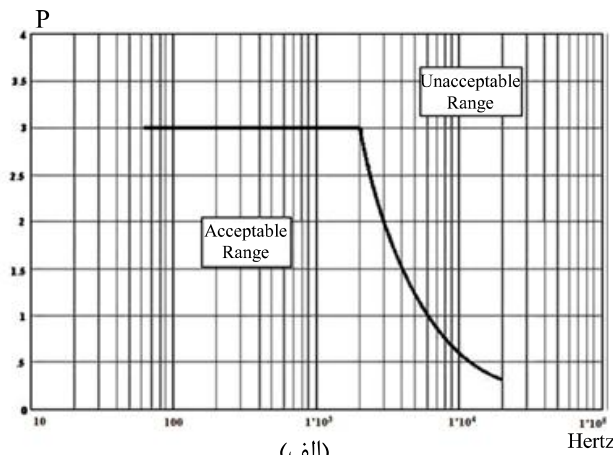
شکل ۶. (الف) جریان و ولتاژ روشنایی فلورسنت با بالاست الکترونیکی؛ (ب) طیف فرکانسی جریان لامپ‌های فلورسنت با بالاست الکترونیکی و مغناطیسی [۸]

سریع می‌شود [۸]. مبدل‌های بسامدی برای کنترل هر دو نوع ماشین‌های سنکرون و ماشین‌های القایی قفس سنجابی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۵- الف یک مبدل بسامدی ۶ پالس ۳ فاز که به منظور راه‌اندازی و کنترل به موتور القایی با اتصال ستاره متصل شده است مشاهده می‌شود. در شکل ۵- ب ولتاژهای ورودی و خروجی، به ازای زاویه‌های آتش مختلف برای پل‌های تریستوری (زاویه آتش پل مثبت و زاویه آتش پل منفی) مشاهده می‌شوند.

این مبدل‌ها موجب تولید میان‌هارمونیک‌ها (هارمونیک‌هایی با مضارب غیر صحیحی از فرکانس منبع) و زیرهارمونیک‌ها (هارمونیک‌های با مضاربی کوچکتر از فرکانس منبع) در سامانه قدرت می‌شوند.



شکل ۵. (الف) سیکلوکانورتر ۶ پالس سه‌فاز برای راه‌اندازی موتور القایی (ب) ولتاژ ورودی و ولتاژهای خروجی سیکلوکانورتر به‌ازای زاویه‌های آتش مختلف پل تریستوری [۸]



شکل ۷. نمودار محدودیت جریان‌های هارمونیک با فرکانس بالای ۶۰ هرتز در کشتی‌های نظامی

P: Percent Of 60Hz Fundamental Current (A)

(الف) بارهای الکتریکی با توان برابر یا بیشتر از ۱ کیلو-ولت-آمپر

(ب) بارهای الکتریکی با توان مصرفی کمتر از ۱ کیلو-ولت-آمپر [۹]

جدول ۱. حداکثر مقدار مجاز هارمونیک‌های جریان طبق استاندارد نظامی

MIL-STD-1399-300B برای کشتی‌ها [۹]

حداکثر مقدار مجاز (I_h/I_1)	توان مصرفی بار (P_{load})	فرکانس هارمونیک (f_h)
۳٪	بزرگتر یا مساوی ۱KVA	۶۰Hz تا ۲۰۰۰ Hz
$(f/6000)\%$	بزرگتر یا مساوی ۱KVA	۲۰۰۰Hz تا ۲۰KHz
$(f/6000)\%$	کوچکتر از ۱KVA	۶۰Hz تا ۲۰ KHz

۵. صافی ترکیبی در سامانه قدرت کشتی‌های نظامی

با توجه به مطالب عنوان شده در بخش ۴، نیاز به استفاده از صافی‌های حذف‌کننده هارمونیک‌ها در سامانه قدرت شناورهای دریایی امری کاملاً ضروری به‌نظر می‌رسد. صافی هیبرید قدرت ترکیبی از یک یا چند صافی غیرفعال به‌همراه یک صافی فعال است. وظیفه صافی غیرفعال، حذف هارمونیک‌ها در یک یا چند فرکانس هارمونیک مشخص و همچنین جبران‌سازی توان غیر حقیقی است. در حالی که صافی فعال، قابلیت حذف بازه وسیعی از هارمونیک‌های فرکانس بالا را دارد.

در حالت کلی، اصول کار صافی‌های غیرفعال بر پایه ایجاد تشدید سری در فرکانس هارمونیک تنظیم شده می‌باشد، در حالی که اصول عملکرد صافی فعال بر اساس تزریق مؤلفه‌های هارمونیک با دامنه برابر و اختلاف فاز ۱۸۰ درجه با هارمونیک‌های شبکه است. در این صورت از دید شبکه، مجموع مصرف‌کننده الکتریکی هارمونیک‌زا و صافی ترکیبی قدرت به‌عنوان یک بار با اعوجاج پایین مشاهده خواهد شد.

به‌دلیل نگرانی‌های موجود از افزایش روزافزون بارهای هارمونیک‌زا در سامانه قدرت کشتی‌ها، استانداردهای محدودکننده برای حداکثر میزان هارمونیک تولید شده توسط تجهیزات الکتریکی وضع شده است. از جمله این استانداردها می‌توان به استاندارد ABS^۱ که توسط سازمان حمل و نقل آمریکا انتشار یافته است [۸] و همچنین استاندارد نظامی وزارت دفاع آمریکا اشاره نمود که مختص کشتی‌های جنگی وضع شده است [۱۳].

بر اساس استاندارد نظامی ذکر شده، حداکثر مقدار مجاز هارمونیک‌های جریان تجهیزات الکتریکی با فرکانس کاری ۶۰ هرتز به‌صورت جدول ۱ تعریف می‌شود (f فرکانس اصلی است). با در نظر گرفتن بارهای هارمونیک‌زای مهم معرفی شده در بخش ۴ در سامانه قدرت کشتی‌های دریایی، مدل سامانه قدرت یک کشتی جنگی با توان متوسط که از سه ژنراتور ۲ مگاوات تشکیل شده است، به‌همراه بارهای هارمونیک موجود در آن، شامل موتورهای سامانه محرکه به‌همراه کنترل‌کننده‌های سرعت، سامانه روشنایی کشتی، سامانه سلاح، مبدل‌های فرکانسی و منابع تغذیه سامانه‌های رایانه‌ای و مکان‌یابی در شکل ۸ مشاهده می‌شوند که در صفحه بعد. همچنین مشخصات این سامانه در جدول ۲ مشاهده می‌شود (شکل ۸ و جدول ۲ در صفحه بعد آورده شده است).

1- American Bureau of Shipping

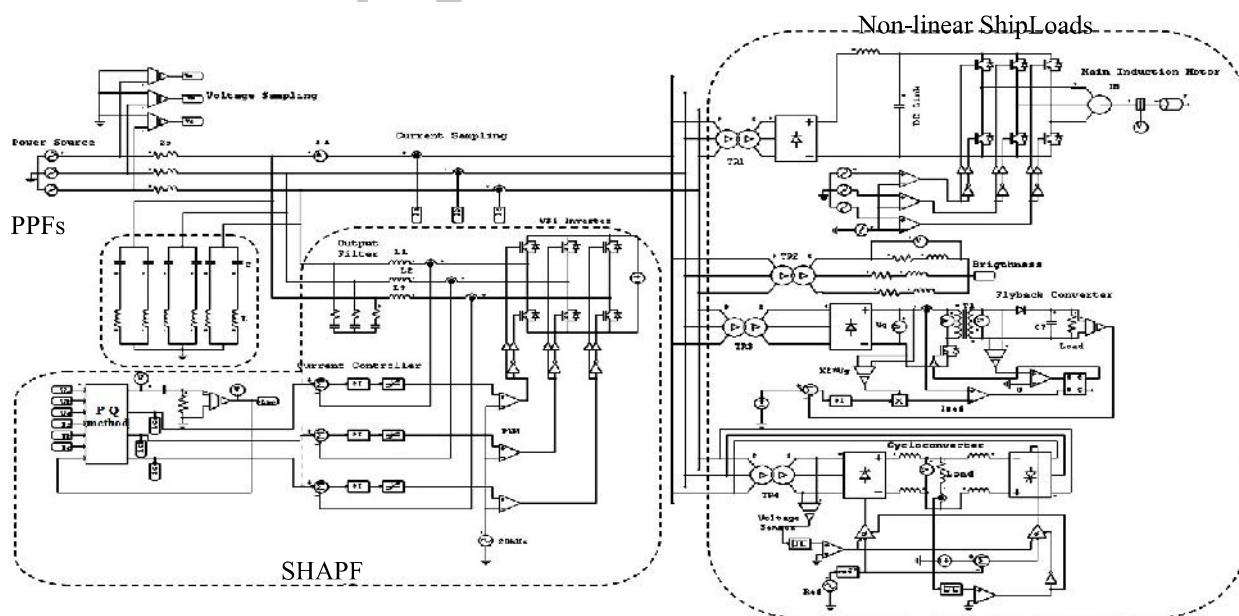
جدول ۲. مشخصات سامانه قدرت کشتی مورد نظر

نوع یا مقدار	مشخصه
سه فاز سه سیمه ایزوله	سامانه توزیع اولیه و ثانویه
۴۴۰ V	ولتاژ خط سامانه
۶۰ Hz	فرکانس سامانه
۶ MW	توان تولیدی

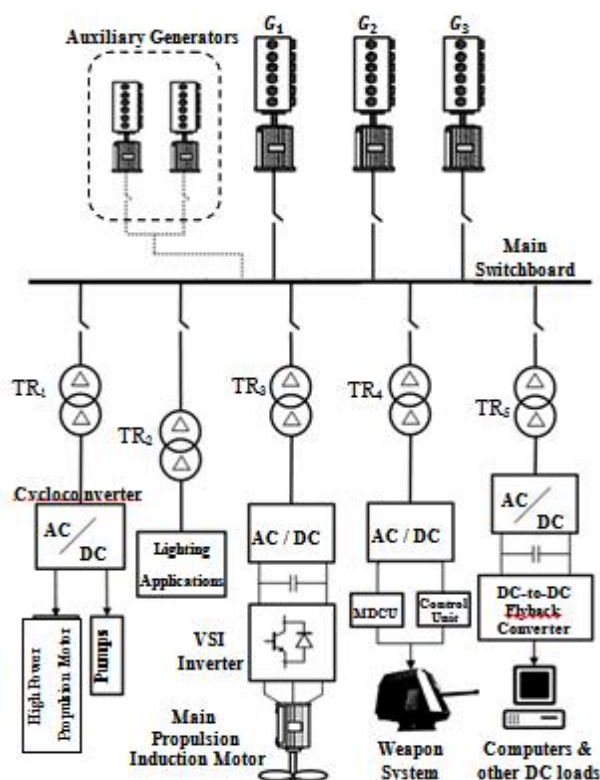
دارای مشخصات ۱۲۰ ولت، سه فاز و ۶۰ هرتز هستند که از طریق مبدل‌های کاهنده ولتاژ تغذیه می‌شوند [۱۴]. اکثر سامانه‌های توزیع AC کشتی‌ها فاقد اتصال زمین هستند. در سامانه‌های الکتریکی فاقد اتصال زمین، هیچ اتصالی بین هادی‌های الکتریکی سامانه و بدنه کشتی وجود ندارد. این سامانه‌ها برای تأمین قابلیت اطمینان بالاتر انتخاب می‌شوند، چون جریان غیر کافی برای عملکرد حفاظت در سامانه متصل به بدنه می‌تواند مانع از قطع به موقع توان توسط تجهیزات حفاظتی گردد. از این جهت در سامانه قدرت کشتی‌ها، در صورت امکان باید اتصال زمین حذف شود. با توجه به مطالب فوق، در این تحقیق نیز سامانه قدرت سه فاز بدون اتصال زمین در نظر گرفته شده است.

۶. نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی سامانه قدرت یک کشتی دریایی با توجه به بارهای هارمونیک‌زای موجود در سامانه به کمک نرم‌افزار PSIM صورت گرفته است که مدار آن در شکل ۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۹. مدار شبیه‌سازی شده سامانه قدرت کشتی با در نظر گرفتن بارهای هارمونیک‌زای سیستم



شکل ۸. مدل سامانه قدرت یک کشتی توان متوسط با بارهای هارمونیک

ولتاژ، فاز و فرکانس سمت اولیه بخش توزیع سامانه قدرت کشتی به ترتیب برابر با ۴۴۰ ولت، سه فاز و ۶۰ هرتز است. سامانه‌های روشنایی

افزایش مقادیر نامی و توان مصرفی صافی فعال خواهد شد. از این‌رو، علاوه بر صافی فعال، برای حذف مؤلفه‌های هارمونیک مرتبه پنجم و هفتم می‌توان از صافی غیرفعال استفاده نمود. مهم‌ترین پارامترهای صافی غیرفعال شامل مقادیر سلف و خازن و ضریب کیفیت می‌باشند. به‌منظور دستیابی به مناسب‌ترین پارامترهای صافی غیرفعال که به‌ازای آن اعوجاج جریان سامانه کمینه گردد، و همچنین کمترین میزان هزینه صافی، طراحی پارامترها، با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. در اینجا هدف از بهینه‌سازی، یافتن مقادیر مناسب برای صافی‌های غیرفعال مرتبه پنجم و هفتم است که بر طبق آن، میزان اعوجاج هارمونیک جریان (THD_I) کمینه گردد. هدف دیگر، کاهش هزینه صافی غیرفعال است.

عملکرد صافی غیرفعال در فرکانس تشدید شاخه تنظیم می‌شود. در این فرکانس، راکتانس سلف با خازن برابر می‌باشد. رابطه فرکانس زاویه‌ای تشدید در صافی غیرفعال مرتبه n به‌صورت رابطه (۱) است:

$$2\pi f_n = \frac{1}{\sqrt{L_n \cdot C_n}} \quad (1)$$

که در آن فرکانس هارمونیک مرتبه n و L_n و C_n به‌ترتیب سلف و خازن صافی غیرفعال هستند. نسبت راکتانس صافی به مقاومت سری شاخه، به‌عنوان ضریب کیفیت صافی غیرفعال (Q) شناخته می‌شود:

$$Q = \frac{X_n}{R_n} \quad (2)$$

در نتیجه برای خازن و مقاومت هر صافی غیرفعال مرتبه n روابط (۳) و (۴) برقرار است:

$$C_n = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 \cdot L_n} \quad (3)$$

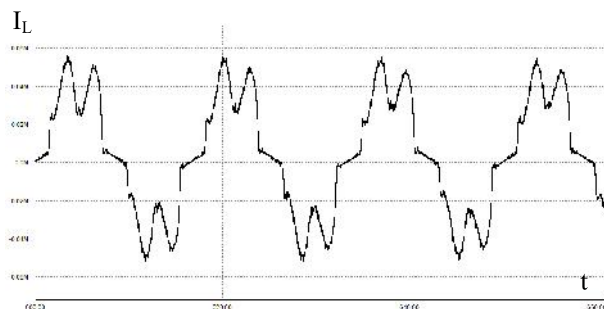
$$R_n = \frac{L_n (2\pi f_n)}{Q} \quad (4)$$

در طراحی صافی غیرفعال تشدید، مقادیر سلف و خازن به یکدیگر وابسته هستند و در اینجا میزان ضریب کیفیت صافی برابر با ۸۰ در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن روابط (۵) و (۶) برای امپدانس هارمونیک معادل صافی مرتبه پنجم و هفتم، می‌توان امپدانس کلی سامانه را با استفاده از رابطه (۷) محاسبه نمود.

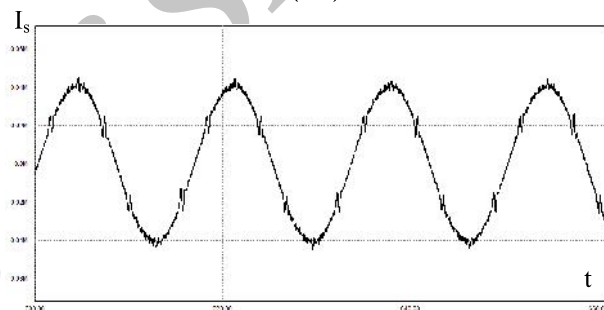
$$Z_n = R_n + \frac{j}{C_n} \left(\frac{k}{n^2 \omega_s} - \frac{1}{k \omega_s} \right) \quad (5)$$

$$Z_5 = R_5 + \frac{j}{C_5} \left(\frac{-24}{25\omega} \right), Z_7 = R_7 + \frac{j}{C_7} \left(\frac{-48}{49\omega} \right) \quad (6)$$

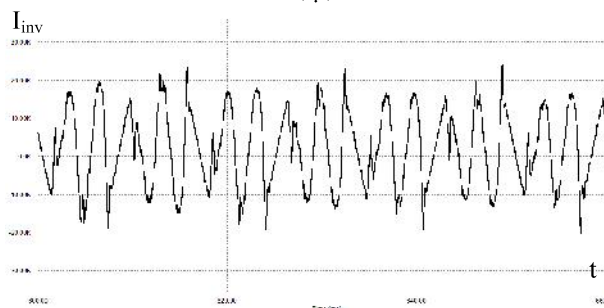
شکل‌موج‌های حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۱۰ ارائه شده‌اند. در حالتی که تنها از صافی فعال برای جبران‌سازی استفاده شود، جریان هارمونیک بار (I_L)، جریان منبع (I_S) که به فرم سینوسی نزدیک شده است و جریان جبران‌سازی مبدل DC/AC (I_{inv}) مطابق شکل-های ۱۰-الف تا ۱۰-ج هستند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰. نتایج شبیه‌سازی؛ (الف) جریان بار (I_L)

(ب) جریان منبع پس از جبران‌سازی فقط با صافی فعال (I_S)

(ج) جریان جبران‌سازی اینورتر (I_{inv})

۷. طراحی بهینه پارامترهای صافی غیرفعال با الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA)

با وجود عملکرد مناسب صافی فعال قدرت، در حذف مؤلفه‌های نامطلوب هارمونیک، وجود دامنه بالای جریان‌های هارمونیک مرتبه پایین‌تر (هارمونیک مرتبه پنجم و هفتم) در این سامانه، موجب

در این تحقیق، برای محاسبه تابع هدف کلی از روش مجموع وزن گذاری شده استفاده شده است. که عبارتست از: ادغام مناسب توابع هدف با وزن مشخص در یک تابع و تمرکز بر کمینه سازی تابع هدف کلی. از این رو تابع هدف این مسئله می تواند به صورت رابطه (۱۱) درآید:

$$F'_T = W_1 \cdot F'_1 + W_2 \cdot F'_2 \quad (11)$$

که F'_1 و F'_2 توابع هدف هستند که در بازه $[0, 1]$ نرمالیزه شده اند. تابع هدف نرمالیزه کلی و W_1 و W_2 وزن های مربوط به هر یک از توابع هدف هستند. همچنین، برای وزن ها رابطه $\sum W_i = 1$ برقرار است. مقادیر ضرایب تابع هزینه در جدول ۳ ارائه شده اند.

جدول ۳. مقادیر ضرایب تابع هزینه

مقدار	ضرایب
۰/۶۷	W_1
۰/۳۳	W_2
۰/۰۴۵	α
۰/۱۲	β
۰/۰۱	γ

با در نظر گرفتن شرایط فوق، بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک بر روی رابطه (۱۲) به همراه قیدهای مشخص شده صورت می گیرد:

$$\min (W_1 [\alpha \cdot (\sum_{n=5,7} \frac{1}{(2\pi f_n)^2 \cdot C_n}) + \beta \cdot (\sum_{n=5,7} C_n) + \gamma \cdot (\sum_{n=5,7} R_n)] + [\sum_{n=5,7} (\frac{Z}{Z_n})^2 \times 100]) \quad (12)$$

$$C_{n,\min} \leq C_n \leq C_{n,\max}$$

$$R_{n,\min} \leq R_n \leq R_{n,\max}, n = 5, 7$$

حدود تغییرات مقادیر سلف و خازن هر شاخه صافی غیرفعال با روابط (۱۳) و (۱۴) مشخص شده اند. همان طور که اشاره شد، مقادیر سلف های صافی به مقدار خازن های محاسبه شده وابسته هستند.

$$40\mu F \leq C_5, C_7 \leq 100\mu F \quad (13)$$

$$0.16\Omega \leq R_5, R_7 \leq 0.37\Omega \quad (14)$$

که در آن Z_5 و Z_7 امپدانس معادل صافی های هارمونیک پنجم و هفتم، و ω فرکانس زاویه ای سامانه است. امپدانس کلی معادل سامانه برابر است با:

$$Z = \frac{Z_5 Z_7 Z_s}{Z_5 Z_7 + Z_s Z_7 + Z_5 Z_s} \quad (7)$$

با استفاده از روابط بالا می توان، اعوجاج هارمونیک جریان سامانه به صورت رابطه (۸) نوشت:

$$\%THD_1 = \sqrt{\sum_{n=5,7} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \times 100 = \sqrt{\sum_{n=5,7} \left(\frac{\frac{V}{Z_n}}{\frac{V}{Z}}\right)^2} \times 100$$

$$= \sqrt{\sum_{n=5,7} \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^2} \times 100 \quad (8)$$

که I_n مولفه هارمونیک مرتبه n جریان، I_1 مولفه اصلی و V ولتاژ شبکه است [۱۵].

۱.۷. توابع هدف و قیدهای مسأله

طبق مطالب عنوان شده در بخش قبل، تابع هدف کیفیت جبران سازی صافی به صورت رابطه (۹) است:

$$F_1 = THD_1 = \sqrt{\sum_{n=5,7} \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^2} \times 100 \quad (9)$$

هدف دیگر، کمینه سازی تابع هزینه های صافی غیرفعال است. هزینه صافی غیرفعال شامل هزینه سلف و خازن و مقاومت سری آن است. به دلیل وابسته بودن مقدار L به پارامتر C ، و با توجه به رابطه (۱)، می توان تابع هزینه صافی را برحسب متغیرهای R_n و C_n به صورت رابطه زیر نوشت:

$$F_2 = \text{Cost}(C_5, C_7, R_5, R_7) \quad (10)$$

که α ، β و γ به ترتیب

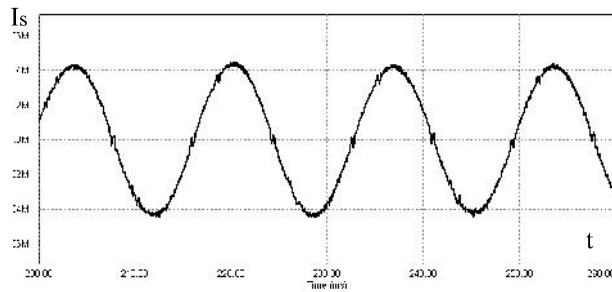
$$= \alpha \cdot \left(\sum_{n=5,7} \frac{1}{(2\pi f_n)^2 \cdot C_n}\right) + \beta \cdot \left(\sum_{n=5,7} C_n\right) + \gamma \cdot \left(\sum_{n=5,7} R_n\right)$$

ضرایب افزایش هزینه به ازای افزایش در مقادیر سلف (mH)، خازن (μF) و مقاومت (Ω) هر یک از صافی ها هستند.

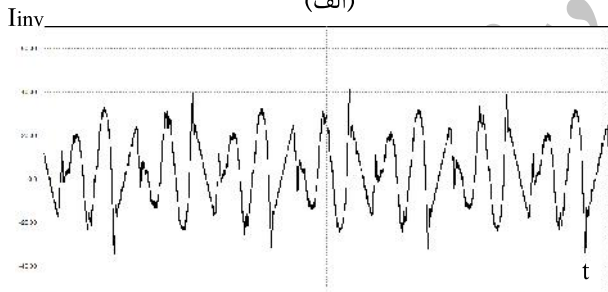
جدول ۴. پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم ژنتیک

مشخصه	نوع یا مقدار
نوع کدگذاری کروموزوم‌ها	باینری
تعداد جمعیت اولیه	۵۰
تولید جمعیت اولیه	تصادفی
نوع تابع انتخاب	رولت
نوع تلفیق	تک نقطه‌ای
درصد تلفیق	۷۵٪
احتمال جهش	۵٪
حداکثر تکرار	۱۰۰

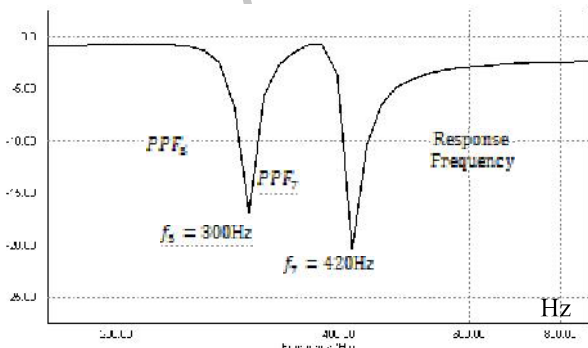
غیرفعال مورد نظر نمایش می‌دهد. پس از اضافه شدن صافی غیرفعال (PPF) به صافی فعال (APF) و استفاده به‌عنوان صافی ترکیبی موازی (SHAPF) در سامانه قدرت کشتی، شکل موج‌های جریان خط (Is)، جریان اینورتر (Iinv) و نمودار تحلیل فرکانسی صافی غیرفعال تشدیدی بهینه در شکل‌های ۱۲-الف تاج مشاهده می‌شوند. در این حالت، میزان اعوجاج هارمونیک جریان سمت منبع سامانه قدرت به مقدار $THD=4.17\%$ کاهش یافته است که نسبت به حالت بدون جبران‌سازی هارمونیکی ($THD=43.31\%$) و جبران‌سازی تنها با صافی فعال موازی ($THD=7.08\%$)، بهبود در عملکرد صافی را نمایش می‌دهد. همچنین در این حالت ضریب توان سامانه برابر با $PF=97.6\%$ می‌باشد.



(الف)



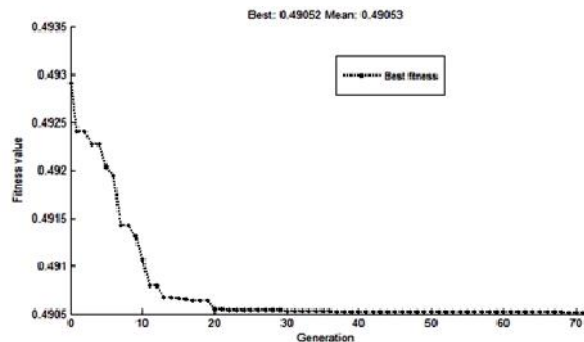
(ب)



(ج)

شکل ۱۲. (الف) جریان سمت منبع پس از جبران‌سازی با صافی ترکیبی بهینه؛ (ب) جریان تزریقی اینورتر

پارامترهای تنظیم شده برای الگوریتم ژنتیک در این مسئله در جدول ۴ ارائه شده‌اند. روش الگوریتم ژنتیک با استفاده از نرم-افزار MATLAB بر روی مقادیر صافی اجرا گردیده است. نمودار جستجوی الگوریتم برای یافتن مقادیر بهینه صافی غیرفعال مرتبه ۵ و ۷ در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. همچنین جدول ۵ مقادیر عناصر محاسبه شده را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک برای صافی



شکل ۱۱. نمودار جستجوی GA در نسل‌های تولیدی برای دستیابی به پاسخ بهینه

جدول ۵. مقادیر بهینه حاصل از GA برای صافی غیر فعال

مقدار	عنصر
$54/101 \mu F$	C_5
$5/207 mH$	L_5
$0/243 \Omega$	R_5
$48/827 \mu F$	C_7
$2/944 mH$	L_7
$0/280 \Omega$	R_7

مقایسه نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی سامانه در شرایط عدم جبران‌سازی، جبران‌سازی هارمونیک با صافی فعال و جبران‌سازی با صافی ترکیبی بهینه‌سازی شده، بیانگر تاثیر قابل توجه استفاده از صافی ترکیبی بهینه می‌باشد که شامل حذف بخش قابل توجهی از مؤلفه‌های نامطلوب هارمونیک و کاهش میزان اعوجاج هارمونیک کلی جریان (THD_i) از مقدار ۴۳/۳۱٪ به ۴/۱۷٪ و همچنین بهبود ضریب توان سامانه قدرت کشتی از ۶۴/۸٪ به ۹۷/۶٪ است.

بهبود حاصل شده به‌موجب استفاده از صافی ترکیبی بهینه در سامانه، موجب تحقق اهدافی چون، کاهش جریان مؤثر خط، کاهش تلفات سامانه، افزایش قابلیت اطمینان ادوات حفاظتی سامانه قدرت و جلوگیری از عملکرد ناخواسته و نادرست آنها، افزایش طول عمر و کاهش ظرفیت نامی تجهیزات و در نتیجه آن کاهش وزن، ابعاد و هزینه‌های تجهیزات شبکه می‌گردد. این موارد به‌وضوح موجب افزایش ایمنی سرنشینان کشتی، افزایش فضای بهینه کشتی‌ها و بهبود قابلیت اطمینان و کیفیت توان سامانه قدرت حساس کشتی-های نظامی خواهد شد.

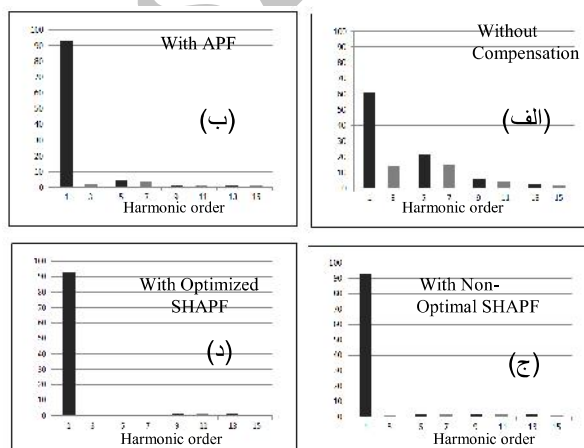
۹. مراجع

- [1] Qi, L, Qiang. L, Cartes. D, Woodruff. S, Initial Results in Prony Analysis for Harmonic Selective Active Filters, IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp.1-6, Montreal, Canada, October 2006.
- [2] Singh. B, Al-Hadda. K, Chandra. A, A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, Issue. 5, pp. 960-971, 1999.
- [3] Liang, X, Ilochonwu O, Passive Harmonic Filter Design Scheme, IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 17, Issue. 5, pp. 36-44, 2011.
- [4] Kim. S, Enjeti. P.N, 'A New Hybrid Active Power Filter (APF) Topology', IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, Issue. 1, pp. 48-54, 2002.
- [5] Arendt. R, Simulation Investigations of Ship Power Systems, 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 1-4, Rome, Italy, June 2011.
- [6] Ouroua. A, Domaschk. L, Beno. J.H, Electric Ship Power System Integration Analyses Through Modeling and Simulation, IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp. 70-74, Austin TX, USA, October 2011.
- [7] Chattopadhyay. S, Mitra. M, Sengupta. S, Electric Power Quality (1st Edition), Springer Publication, 2011.
- [8] Guidance Notes. Control of Harmonics in Electrical Power Systems, American Bureau of Shipping (ABS Plaza), USA, May 2006.

بهبود حاصل شده در مشخصه‌های سامانه پس از طراحی مناسب صافی ترکیبی و به‌کارگیری آن در سامانه قدرت در جدول ۶ نشان داده شده است. نسبت جریان‌های هارمونیک مرتبه فرد به جریان مؤثر کل (In/Irms) در شرایط پیش و پس از جبران‌سازی در شکل ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۶. درصد بهبود در مشخصه‌های سامانه در شرایط استفاده از صافی ترکیبی طراحی شده

مشخصه	درصد بهبود
کاهش اعوجاج جریان (THD _i)	٪۹۰/۳۷
افزایش ضریب توان	٪۳۳/۶۱
کاهش تلفات	٪۵۵/۹۷
کاهش ظرفیت صافی فعال	٪۳۴/۸۶



شکل ۱۳. نسبت جریان‌های هارمونیک به جریان مؤثر کل؛ (الف) بدون جبران‌سازی؛ (ب) جبران‌سازی با صافی فعال (APF)؛ (ج) با صافی ترکیبی غیربهینه؛ (د) با صافی ترکیبی بهینه

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا به معرفی و بررسی مهم‌ترین بارهای هارمونیک‌زا در سامانه قدرت کشتی‌های نظامی پرداخته شد. سپس با شبیه‌سازی بارهای هارمونیک سامانه در یک کشتی نظامی با توان متوسط، و به‌منظور کاهش مؤلفه‌های نامطلوب هارمونیک جریان و افزایش ضریب توان، صافی ترکیبی موازی (SHAPF) مناسب برای آن طراحی گردید. برای دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای بخش غیرفعال صافی و کاهش هزینه‌های صافی ترکیبی، پس از فرمول-بندی هر یک از اهداف، روش الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی مسئله مورد استفاده قرار گرفت.

- [13] Chen. C.S, WU. J.S, Yen. I.H, Harmonic Analysis of Distribution Systems, Elsevier Sequoia, Vol. 17, Issue. 3, pp. 171-177, 1989.
- [14] Naval Ships' Technical Manual. Electric Power Distribution Systems, Published by Direction of Commander, Naval Sea Systems Command, March 2005.
- [15] Dehini. R, Berbaoui. B, Benachaiba. C, Harici. O, Shunt Hybrid Active Power Filter Improvement Based On Passive Power Filters Synthesis by Genetic Algorithm, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2, Issue. 5, pp. 1185-1193, 2010.
- [9] Military Standard 1399 (Navy). Electric Power, Alternating Current, Department of Defense Interface Standard, Section 300B, USA, 2008.
- [10] Evans. I.C, Hoevenaars. A.H, Eng. P, Meeting Harmonic Limits on Marine Vessels, IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp. 115-121, Arlington, USA, May 2007.
- [11] Military Standard M-17060E. Military Specification Motors, 60-Hz, Alternating Current, Integral-Horsepower, Shipboard Use, Department of The Navy, Naval Ship Engineering Center, Section 6124, Washington, USA, 1977.
- [12] EMDigital Defence Engineering and Manufacturing Company, <http://www.emdigital.co.uk/index.htm/>

Archive of SID