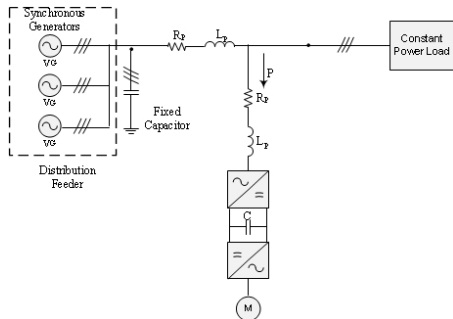


## پایداری سیستم قدرت کشتی در حضور درایوهای کنترل فرکانس

سهیل رنجبر

استادیار، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، s.ranjbar@velayat.ac.ir

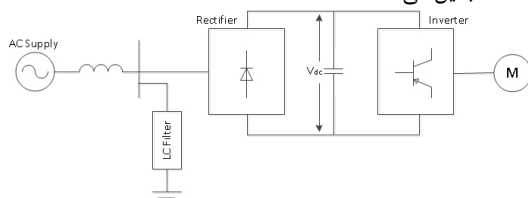


شکل ۱: نمای سیستم الکتریکی نمونه کشتی

درایوهای فرکانس متغیر در ابتدا ولتاژ متناوب AC را به ولتاژ مستقیم DC تبدیل کرده و سپس در فرکانس دیگری این ولتاژ مستقیم شده DC را به ولتاژ متناوب AC برای تامین بار اعمال می‌کنند.

### درایو فرکانس متغیر

در این بخش رفتار سیستم قدرت هنگامی که به یک درایو فرکانس متغیر VFD متصل است، بیان می‌شود. بار متصل شده با VFD می‌تواند در فرکانس‌های مختلفی مورد بهره‌برداری قرار گیرد. شکل ۲ نشان دهنده یک درایو فرکانس متغیر است که می‌تواند در این تحقیق مورد استفاده قرار گیرد. VFD ابتدا ولتاژ متناوب AC را به ولتاژ مستقیم DC تبدیل می‌کند و سپس در مرحله آخر ولتاژ مستقیم DC را در فرکانس دلخواه به ولتاژ متناوب AC تبدیل می‌کند.



شکل ۲: نمای کلی درایو فرکانس متغیر

مطابق با شکل ۲، برای قسمت یکسوساز AC به DC از یک پل دیودی یکسوساز استفاده شده است. قوانین مرتبط با نحوه بهره‌برداری از درایو و اینورترها در فصل‌های دوم و سوم به‌طور کامل توضیح داده شده است. در این بخش عملکرد VFD در حالت عادی همراه با نتایج شبیه‌سازی توضیح داده می‌شود.

### بهره‌برداری دینامیکی بار

در این قسمت، یک بار دینامیکی بر روی درایو VFD مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمایی از عملکرد بار در ابتدای راه‌اندازی در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود پس از زمان  $t = 1/5$  ثانیه، یک بار

### چکیده

در این مقاله، با استفاده از درایوهای کنترل فرکانس، به بررسی کنترل توان اکتیو و راکتیو در سیستم الکتریکی کشتی پرداخته می‌شود. همچنین تغییرات متناوب بار و دینامیک بارهای پیچیده منتج شده از مبدل‌های فرکانسی و درایوها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور با استفاده از درایوهای کنترل فرکانسی، نحوه عملکرد درایوهای مورد استفاده در کشتی با در نظر گرفتن ملاحظات بهره‌برداری مورد بررسی قرار گرفته و با شناسایی مشکلات هر ساختار، روش‌های کاهش نوسانات ولتاژی و هارمونیک در بخش نظری این تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. باتوجه به آن که یکسوساز استفاده شده در درایو فرکانس متغیر یک مبدل دو طرفه بوده که می‌تواند AC را به DC و DC به AC تبدیل کند لذا این گونه یکسوسازها نه تنها ولتاژ مورد نیاز را فراهم می‌آورند، بلکه ولتاژ سیستم را نیز با حذف هارمونیک از جریان منبع و تزریق توان راکتیو به سیستم، تنظیم می‌کنند. همچنین میزان اعوجاج هارمونیک با استفاده از یک مبدل فرکانس متغیر بررسی شده و معیار مجاز اعوجاج هارمونیک برای انواع طرح‌های درایو، معرفی شده است. باتوجه به آن که نتایج حاصل از این تحقیق در یک کار تخصصی مورد استفاده قرار می‌گیرد لذا در این مقاله مطالعات شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه کشتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

### واژگان کلیدی

پایداری، کنترل فرکانس، درایو، بارهای دینامیک.

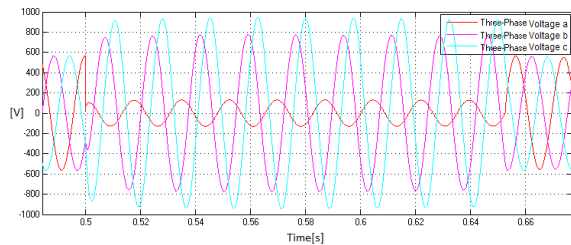
### مقدمه

در سیستم قدرت کشتی، بیشتر بارهای مصرفی با توجه به منبع ولتاژ متناوب (AC) طراحی شده‌اند. در این حالت، ژنراتورهای سنکرون<sup>۱</sup> (SG) به منظور فراهم آوردن ولتاژ مورد نیاز AC مورد استفاده قرار می‌گیرند. به علت قابلیت اطمینان بالا در بهره‌برداری موازی، واحدهای ژنراتوری به صورت موازی در یک مجموعه سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌نحوی که در موارد مورد نیاز از این ژنراتورها برای بارگذاری در سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمایی از یک مدل ساده سیستم قدرت کشتی در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱، سیستم الکتریکی کشتی از درایوهای معرفی شده در فصل سوم برای کنترل و بهره‌برداری بدون اعوجاج توان، استفاده می‌کند. برای تولید توان، از مجموعه منابع تولید و به‌صورت موازی استفاده شده، در حالی که مصرف‌کنندگان شامل بارهای موازی RLC با توان ثابت هستند. به‌طور معمول توان از طریق درایوها به بارها عرضه می‌شود. در تامین بارها همچنین از درایوهای فرکانس متغیر برای بهره‌برداری بارها استفاده می‌شود.

<sup>2</sup> VFD: Variable Frequency Drive

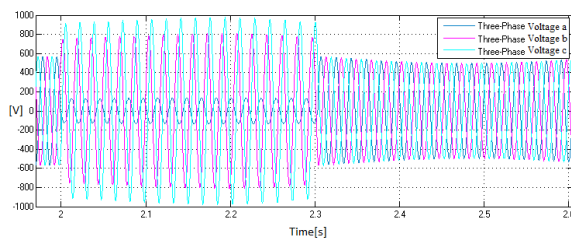
<sup>1</sup> SG: Synchronous Generator

در ابتدا تجزیه و تحلیل برای یک خط فاز به زمین بدون حضور VFD انجام می‌پذیرد. بدین منظور یک خطای تک فاز به زمین در فاز a در زمان  $t = 0/5$  ثانیه اعمال شده و در زمان  $t = 0/65$  ثانیه برطرف می‌شود. همچنین مقاومت خطای اعمال شده برابر با  $0/2$  اهم است. رفتار نوسانات ولتاژ به ازای خطای اعمالی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نوسانات ولتاژ ناشی از خطای تک فاز به زمین بدون حضور VFD همان‌طور که مشاهده می‌شود، ولتاژ خطا دیده به علت اتصال کوتاه کاهش یافته و دو فاز دیگر که خطا بروی آن‌ها اعمال نشده است سعی دارند تا توان مورد نیاز را تامین کنند که در ادامه به میرایی هر سه فاز منجر شده است. همچنین مشاهده می‌شود به ازای خطای اعمالی، دامنه ولتاژ دو فاز بایکدیگر برابر نبوده و در نهایت پس از رفع خطا در زمان  $t = 0/65$  ثانیه، ولتاژ به حالت پایدار خود می‌رسد.

در ادامه این بخش، شبیه‌سازی‌ها در حضور VFD در سیستم بررسی می‌شود. در حالت خطای تک فاز به زمین، ولتاژ تمامی فازهای a, b, c در شکل ۶ نشان داده شده است. در این حالت خطا در فاز a در فاصله زمانی  $t = 2$  ثانیه الی  $t = 2/3$  ثانیه در شبکه اعمال شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ولتاژ خطا در فاز a به علت اتصال کوتاه کاهش یافته در حالی که ولتاژ دو فاز دیگر با دامنه‌های متفاوتی از حالت ماندگار خود عمل می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود پس از رفع خطا در  $t = 2/3$  ثانیه، ولتاژ سیستم بلافاصله به حالت عادی خود برنگشته و برای بازیابی به حالت ماندگار خود، نیاز به زمان دارد.

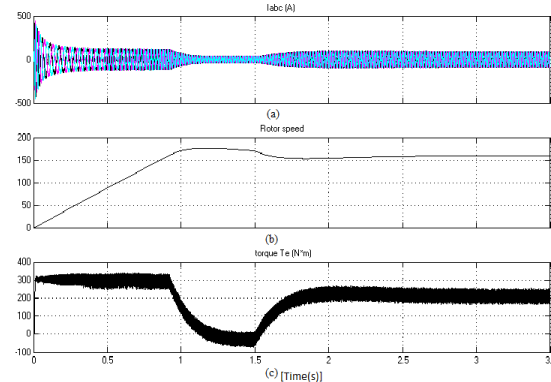


شکل ۶: نوسانات ولتاژ ناشی از خطای تک فاز به زمین با حضور VFD

#### مطالعات بهبود کیفیت توان و پروفیل ولتاژ

در ادامه مطالعات شبیه‌سازی، به عملکرد موازی مجموعه منابع تولید و بار در حضور درایوهای VFD پرداخته شده است. بار غیرخطی مورد نظر در این مطالعه از طریق اتصال یک مجموعه یکسوساز صورت پذیرفته که باعث ایجاد هماهنگی تزریق توان در سیستم می‌شود، اگرچه این موضوع ممکن است منجر به ایجاد نوسانات ولتاژی و ناپایداری ولتاژ شود. مدل سیستم الکتریکی در محیط نرم‌افزاری MATLAB / SIMULINK<sup>TM</sup> شبیه‌سازی شده است. با توجه به کلید زنی حضور ادوات الکترونیک قدرت، باعث مشکلات کیفیت توان در شبکه می‌شوند. درایو VFD مورد مطالعه، شامل یک اینورتر مبدل توان است. شبیه‌سازها در سناریوهای مختلفی اجرا شده و در هر حالت

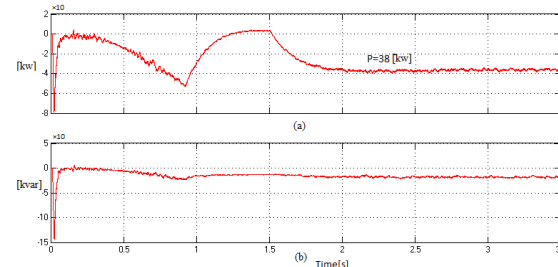
دینامیکی به میزان  $200\text{Nm}$  به سیستم اضافه شده است. به ازای این حالت می‌توان مشاهده نمود که بار مورد نظر، به علت توان بالا، جریان بالایی مصرف می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که بعد از زمان  $t = 1$  ثانیه، بار به حالت پایدار خود می‌رسد. مطابق با شکل، مشاهده می‌شود، هنگامی که توان بار افزایش می‌یابد، سرعت نیز کاهش می‌یابد. افزایش توان، تقاضای جریان بیشتری کرده که این امر با کاهش سرعت همراه است. شکل ۳-الف، نشان دهنده جریان، ۳-ب، نشان دهنده سرعت و شکل ۳-ج، نشان دهنده گشتاور بار است.



شکل ۳: متغیرهای بار القایی هنگام اتصال به شبکه همراه با VFD

#### تأثیر بار القایی بر روی شبکه

شکل ۴ تأثیر یک بار دینامیکی در شبکه را در دو حالت مصرف توان اکتیو (شکل ۴-الف) و مصرف توان راکتیو (شکل ۴-ب) نشان می‌دهد. علامت منفی در این شکل به معنای مصرف کننده توان اکتیو است به طوری که هر دو توان اکتیو و راکتیو توسط بار مصرف می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت گشتاور راه‌اندازی، توان اکتیو و راکتیو بالایی مصرف شده است. تاجایی که در زمان  $t = 1$  و پس از یک ثانیه، به حالت ماندگار می‌رسد. با اضافه نمودن بار در زمان  $t = 1/5$  ثانیه مشاهده می‌شود که توان مصرفی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. در طول زمان حالت ماندگار،  $40$  کیلووات توان اکتیو و  $2$  کیلووار توان راکتیو مصرف شده که نشان دهنده توان راکتیو مصرفی بالایی است. با اضافه شدن بار در زمان  $t = 1/5$  ثانیه ملاحظه می‌شود که توان اکتیو تغییر یافته و مشاهده می‌شود که در طی این مدت، بار توان کاملی را مصرف می‌کند.

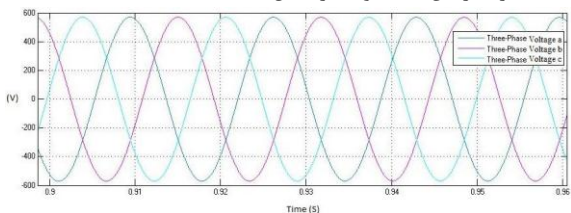


شکل ۴: تأثیر بار القایی بر روی شبکه در قالب توان اکتیو و راکتیو

#### تجزیه و تحلیل خطا با و بدون VFD

در این بخش تجزیه و تحلیل خطای اتصال کوتاه، با و بدون حضور درایو فرکانس متغیر (VFD) بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در این بخش شامل خطای تک فاز به زمین با و بدون حضور VFD در سیستم است.

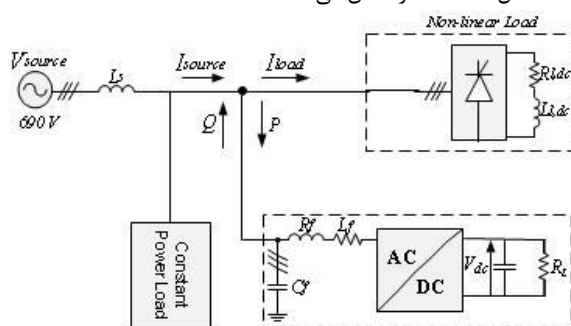
بهره‌برداری قرار گرفته که در این حالت ولتاژ فاز به زمین برابر ۵۶۳ ولت است. ولتاژهای سه‌فاز به زمین a, b, c و در شکل ۹ نشان داده شده است.



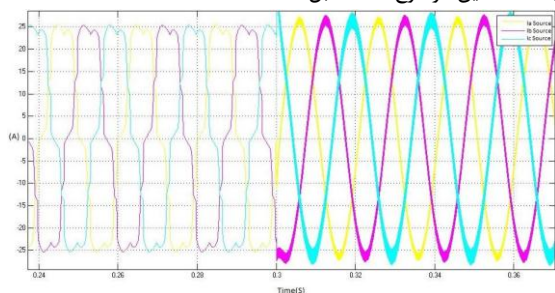
شکل ۹: دامنه ولتاژ فاز با س بار بدون حضور درایو VFD

### ۲-۶ جبران‌سازی هارمونیک توسط منابع تولید ایده‌آل

سناریوی شبیه‌سازی در این مطالعه برای جبران مولفه‌های هارمونیک در سیستم توسط منبع تغذیه ایده‌آل با استفاده از مبدل VSC انجام شده است. از این تکنیک در سیستم‌های الکتریکی کشتی استفاده می‌شود. شکل ۱۰ سیستم الکتریکی نمونه کشتی را با منبع توانی ایده‌آل که همراه با بار غیرخطی، بار ثابت و بار جریان مستقیم است و از طریق مبدل کانورتوری VSC متصل شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: سیستم الکتریکی نمونه همراه با منبع توان ایده‌آل و بار غیرخطی مولفه‌های هارمونیک در این سیستم به علت بارهای غیرخطی تولید شده و با کمک مبدل‌ها هموار می‌شوند. مبدل VSC توسط یک کلید قطع‌کننده مدار، به سیستم متصل شده است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ منبع جریان را پس از اتصال مبدل‌ها در مدار برای سه فاز و تک فاز نشان می‌دهد. شبیه‌سازی حضور مبدل‌ها و برای  $t = 0.5$  ثانیه صورت پذیرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدا بارهای غیرخطی منجر به تولید هارمونیک در شبکه شده‌اند. در این قسمت، یک مبدل پل یکسوساز در ثانیه  $t = 0.3$  به سیستم اعمال شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از زمان  $t = 0.3$  ثانیه، مبدل شروع به تامین جریان نموده و موله‌های هارمونیک به نحو صحیحی جبران‌سازی شده که این موضوع کاملاً قابل مشاهده است.



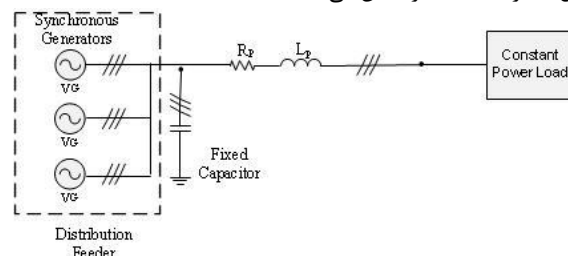
شکل ۱۱: منبع جریانی سه فاز قبل و بعد از اتصال مبدل

مشکلات کیفیت توان و تکنیک های کاهش آن در سیستم بررسی شده است. هارمونیک‌های تولید شده توسط بارهای غیرخطی با کمک مبدل‌های کانورتوری VSC مورد استفاده در VFD، جبران‌سازی می‌شود.

تکنیک جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیک برای نخستین بار توسط منابع ایده‌آل پیاده‌سازی شد. پس از موفقیت‌آمیز بودن کاهش مولفه‌های هارمونیک، موارد گسترش‌یافته‌ای از این طرح در سیستم الکتریکی کشتی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، مولفه‌های هارمونیک با استفاده از درایوهای VFD کاهش می‌یابد. شناسایی مولفه‌های هارمونیک و تجزیه و تحلیل تبدیل فوریه FFT از جریان اصلی در جدول مربوطه ذکر شده است. مبدل کانورتوری VSC که در درایوهای VFD استفاده شده است، می‌تواند برای جبران‌سازی توان راکتیو نیز مورد استفاده قرار گیرد. مبدل VSC توان راکتیو مورد نیاز را در هنگام وقوع خطا، فراهم نموده و دامنه ولتاژ را در محدوده مجاز حفظ می‌نماید.

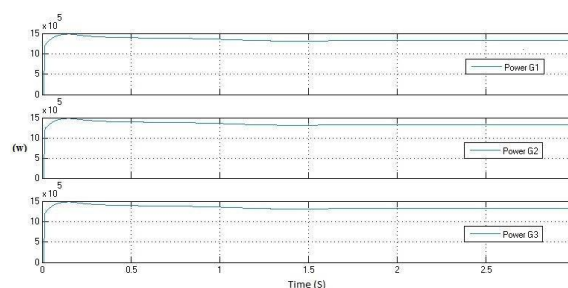
### عملکرد موازی منابع تولید

سیستم الکتریکی کشتی دارای بیش از یک منبع تولید نیرو است که به صورت موازی بهره‌برداری می‌شوند. شکل ۷ عملکرد موازی سه منبع تولید که متصل به بار ثابت است را نشان می‌دهد.



شکل ۷: عملکرد موازی منابع تولید متصل به بار ثابت

شبیه‌سازی‌های مورد نظر با ولتاژ نامی برابر ۶۹۰ ولت انجام شده است. در این سناریو، منابع تولید به صورت موازی مورد بهره‌برداری قرار گرفته و بار را به اشتراک می‌گذارند. نتایج شبیه‌سازی توان تولیدی هر منبع در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: توان تولید شده توسط منابع تولید در حین بهره‌برداری موازی

شکل ۸ توان تولیدی منابع را در حین بهره‌برداری موازی نشان می‌دهد. همچنین یک بار نیز از طریق یک باس‌بار مشترک به منابع متصل شده و توسط منابع تولید تامین می‌شوند. هر منبع تولید در این مجموعه ۳۰ درصد از توان بار را نموده و مجموعه توان بار را تامین خواهند نمود.

شکل ۹ دامنه ولتاژ با س بار را در سه‌فاز نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۹، می‌توان مشاهده نمود که سه فاز مختلف با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه‌ای نسبت به یکدیگر، جدا از هم هستند. سیستم در سطح ولتاژ خط ۶۹۰ ولت مورد

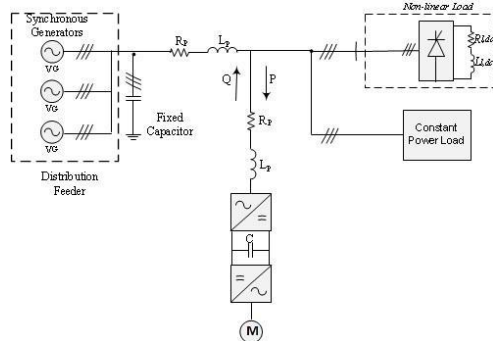
جدول ۱: نتایج FFT برای مولفه‌های هارمونیک با و بدون حضور مبدل‌ها

مولفه	میزان قبل از حضور مبدل	میزان پس از حضور مبدل
Fundamental	100%	100%
<sup>1</sup> 5th	13.63%	0.29%
<sup>1</sup> 7th	4.79%	0.24%
<sup>1</sup> 11th	0.38%	0.01%
<sup>1</sup> 13th	1.34%	0.06%
<sup>1</sup> 17th	2.89%	0.12%
<sup>1</sup> 19th	2.61%	0.12%
THD	15.52%	0.71%

کاهش مولفه‌های هارمونیک پس از اتصال مبدل در سیستم نشان دهنده عملکرد صحیح مبدل است که با موفقیت جبران‌سازی هارمونیک را انجام داده و میزان THD را در محدوده مجاز استانداردهای IEEE قرار داده است.

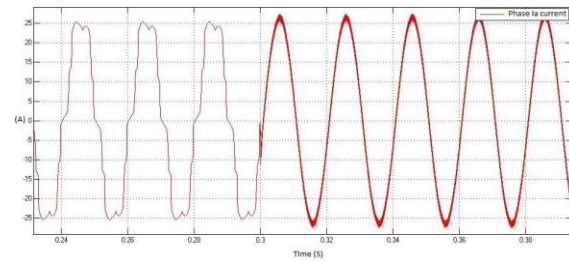
### جبران هارمونیک با یک درایو VFD

شکل ۱۴ سیستم الکتریکی نمونه یک کشتی را با حضور یک درایو VFD و همراه با بار غیر خطی نشان می‌دهد. بار غیرخطی از طریق یک مجموعه پل تاپریستوری به سیستم متصل شده و منجر به تولید هارمونیک در سیستم شده است که با استفاده از مبدل‌های به‌کار رفته در VFD، میزان آن کاهش می‌یابد. همچنین بار ثابت اشاره شده در شکل، یک بار موازی RLC بوده که نشان‌دهنده بارهایی مانند روشنایی، سیستم‌های کامپیوتر و سیستم‌های خنک‌کننده است. در این قسمت از یک طرح کنترلی برای درایو VFD استفاده شده تا هارمونیک‌ها موجود در جریان مبنا را کاهش دهد.



شکل ۱۴-۶: سیستم الکتریکی با درایو VFD و بار غیر خطی

مدل سیستم الکتریکی نمونه در محیط نرم‌افزاری MATLAB / SIMULINK<sup>TM</sup> برای جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیک شبیه‌سازی شده است. جریان سه‌فاز و تک‌فاز را با و بدون درایو در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که پیشتر توضیح داده شده است، علت اصلی تولید هارمونیک در سیستم، وجود بار غیرخطی است. کلید قطع‌کننده جریان، VFD را در زمان  $t = 0.2$  ثانیه به سیستم متصل نموده و در زمان  $t = 2.1$  ثانیه از مدار قطع می‌کند. زمان شبیه‌سازی کل در این سناریو برابر ۲/۵ ثانیه است.

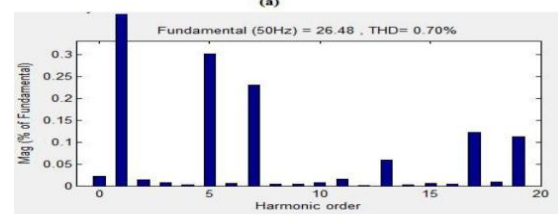
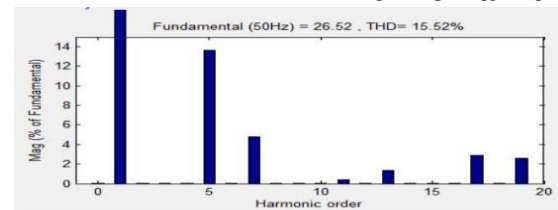


شکل ۱۲: جریان منبع تک فاز قبل و بعد از جبران هارمونیک

از آنجا که منبع تغذیه ایده‌آل تمام سه‌فاز یکسان هستند لذا مطالعه تنها یک فاز انجام شده و برای تمام فازهای دیگر نیز معتبر خواهد بود. شکل ۱۲ جریان تک‌فاز را قبل و بعد از اتصال مبدل VSC نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مولفه‌های هارمونیک قبل از زمان  $t = 0.3$  ثانیه به دلیل بار غیرخطی قابل مشاهده است. با حضور مبدل، شکل موج تحریف‌شده به یک شکل موج سینوسی تغییر یافته است. نتایج حاصل از شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مبدل‌ها برای کاهش مولفه‌های هارمونیک است.

### تجزیه و تحلیل FFT<sup>۳</sup>

برای شناسایی مولفه‌های هارمونیک از تجزیه و تحلیل فوریه سریع‌استفاده شده است. شکل ۶-۱۳ (a) و (b)، میزان انحراف هارمونیک کل (THD) را قبل و پس از اتصال مبدل در سیستم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان THD از ۱۵.۵۲٪ در حالت بدون حضور مبدل به ۰.۷٪ در حضور مبدل کاهش یافته است.

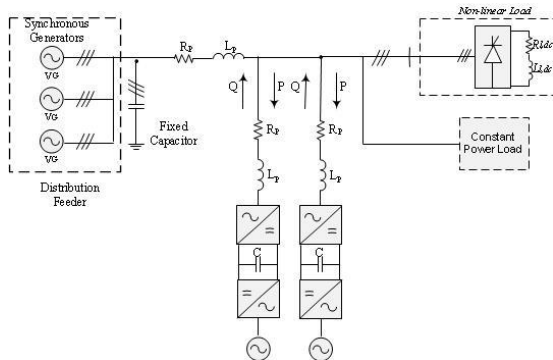


شکل ۱۳: (a) نتایج FFT قبل از اتصال مبدل (b) نتایج FFT پس از اتصال مبدل

جدول ۱ میزان اعواج هارمونیک را قبل و بعد از اتصال مبدل در سیستم نشان می‌دهد. همان‌طور که آورده شده است، میزان THD به طور قابل توجهی از ۱۵/۵۲٪ به ۰/۷۱٪ کاهش یافته است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که جریان‌های هارمونیک مولفه‌های  $I_{5th}$ ،  $I_{7th}$ ،  $I_{11th}$ ،  $I_{13th}$ ،  $I_{17th}$ ،  $I_{19th}$  نقش مهمی را در THD کل زمانی که مبدل به سیستم متصل نیست ایفا می‌کنند. این مولفه‌های هارمونیک به طور قابل توجهی پس از حضور مبدل‌ها به سیستم کاهش یافته است.

<sup>3</sup> FFT: Fast Fourier Transform

مبدل به سیستم متصل شده است، کاهش یافته است. همچنین در جدول ۲ مشاهده می‌شود که مولفه‌های هارمونیک  $I_{3th}$ ،  $I_{5th}$ ،  $I_{7th}$ ،  $I_{11th}$ ،  $I_{13th}$  و  $I_{15th}$  نقش مهمی را در THD کل، زمانی که مبدل به سیستم متصل نیست ایفا می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که میزان این مولفه‌ها با حضور مبدل، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و در محدوده مجاز قرار گرفته است.

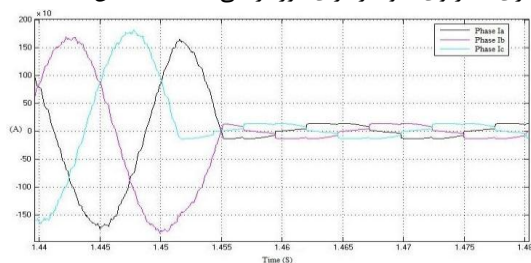


شکل ۱۷: سیستم الکتریکی با دو درایو VFD و بار غیر خطی

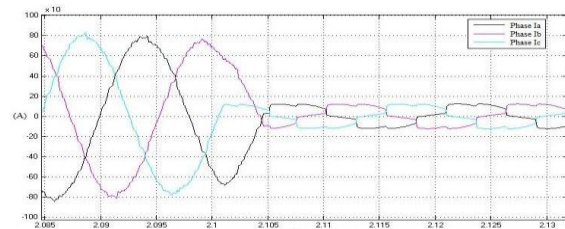
### جبران‌سازی هارمونیک با دو درایو VFD

در شبیه‌سازی قسمت قبل، با استفاده از تنها یک درایو VFD، جبران‌سازی هارمونیک انجام شده است. در این قسمت، سیستم الکتریکی شبکه نمونه به‌ازای حضور دو درایو VFD مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۷ نشان‌دهنده سیستم الکتریکی سیستم نمونه با حضور دو درایو VFD و بار غیرخطی مرتبط است. بار غیرخطی که از طریق پل یکسوساز متصل شده است، هارمونیک‌هایی را در سیستم تولید می‌کند که با استفاده از مبدل‌های VFD سعی در کاهش میزان این هارمونیک بوده است. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ جریان‌های سه‌فاز و تک‌فاز را با و بدون حضور جبران‌سازهای هارمونیک نشان می‌دهد.

همان‌طور که پیشتر توضیح داده شده است، حضور بارهای غیرخطی عامل اصلی تولید هارمونیک‌ها در سیستم است. مطابق با شکل ۱۸، کلید قطع‌کننده، درایو VFD را در زمان  $t = 0.2$  ثانیه به شبکه متصل نموده و سپس در زمان  $t = 1.45$  ثانیه، درایو را از مدار خارج قطع می‌کند. شکل ۱۸ دوره شبیه‌سازی سناریوی نمونه را برای دوره زمانی  $2/5$  ثانیه نشان داده است.

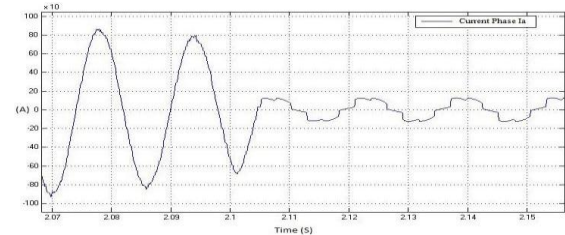


شکل ۱۸: جریان منبع سه فاز با و بدون اتصال درایوهای VFD



شکل ۱۵: منبع جریان سه فاز با و بدون اتصال درایو VFD

مبدل VSC نه تنها هارمونیک‌ها را جبران می‌کند، بلکه توان لازم بار را نیز فراهم می‌آورد. مطابق با شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که مبدل استفاده شده، مولفه‌های هارمونیک را جبران نموده و هنگامی که مبدل مجدداً در زمان  $t = 2.1$  ثانیه از مدار خارج می‌شود، هارمونیک‌ها مجدداً در شکل موج جریانی ظاهر می‌شوند. مقدار بالای بالا جریان در زمان قبل از  $t = 2.1$  ثانیه به‌خاطر وجود بار بوده که این مبدل نه تنها جبران‌سازی هارمونیک را انجام داده است، بلکه جریان مورد نیاز بار را نیز از طریق اینورتر فراهم آورده است.



شکل ۱۶: جریان تک فاز با و بدون حضور درایو VFD

هنگامی که کلید قطع‌کننده در زمان  $t = 2.1$  ثانیه خاموش می‌شود، بار درایو نیز از سیستم حذف شده و یک تغییر ناگهانی در مقدار جریان به‌وجود آمده که این نکته در شکل ۱۵ نشان داده شده است. شکل موج تک‌فاز نشان داده شده مشابه با شکل موج سه فاز است و لذا شبیه‌سازی برای جریان تک‌فاز نشان داده شده و به‌صورت سه‌فاز اجرا شده است. شکل ۱۶، جریان تک فاز سیستم را نشان می‌دهد که نشان دهنده جبران‌سازی مولفه‌های هارمونیک است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده عملکرد موثر مبدل برای حذف و کاهش مولفه‌های هارمونیک بوده است.

جدول ۲: تحلیل FFT جریان در حضور یک درایو VFD در شبکه

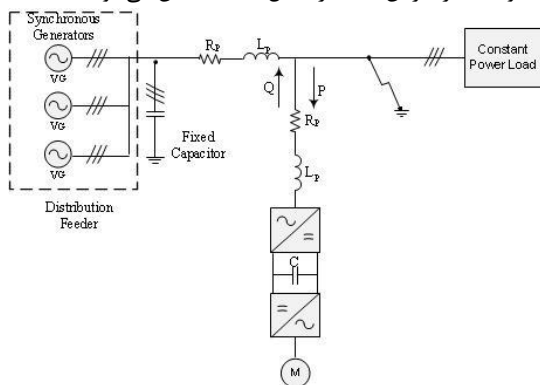
مولفه	مولفه‌های هارمونیک	مولفه‌های هارمونیک
	بدون حضور مبدل	بدون حضور مبدل
Fundamental	100%	100%
<sup>3</sup> rd	3.29%	1.21%
<sup>5</sup> th	17.65%	1.24%
<sup>7</sup> th	6.41%	0.26%
<sup>9</sup> th	1.86%	0.20%
<sup>11</sup> th	6.23%	0.36%
<sup>13</sup> th	2.33%	0.16%
<sup>15</sup> th	1.72%	0.10%
THD	23.16%	4.05%

برای شناسایی میزان مولفه‌ها، مشابه قسمت قبل از تجزیه و تحلیل FFT استفاده شده است. جدول ۲ هارمونیک‌های جریانی به‌ازای بدون و با اتصال مبدل در سیستم، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان THD به‌طور قابل توجهی از میزان  $23.16\%$  به میزان  $4.05\%$  در زمانی که

<sup>1</sup> 5th	0.62%	0.14%
THD	26.03%	3.87%

### بهبود پروفیل ولتاژ با جبران سازی توان راکتیو

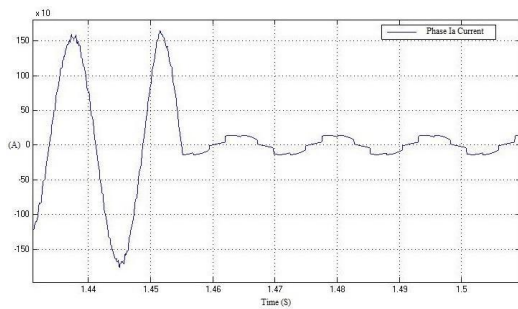
درایوهای VFD در سیستم الکتریکی کشتی می توانند به منظور بهبود پروفیل ولتاژ در صورت خطا بروز خطا، مورد استفاده قرار گیرند. این درایوها نه تنها توان لازه لارها تامین می کنند، بلکه باعث حفظ پایداری ولتاژ در شرایط دینامیکی شبکه نیز می شوند. درایوهای VFD با تزریق توان راکتیو موجب افزایش ولتاژ در هنگام بروز خطا در شبکه می شوند. در این حالت، توان راکتیو با حفظ مولفه صفر جریان  $I_{dref}$  در مبدل VSC تامین می شود.



شکل ۲۰: سیستم الکتریکی شبکه نمونه با حضور یک VFD

### بهبود پروفیل ولتاژ با یک درایو VFD

در این قسمت یک سناریوی خطای سه فاز به زمین با مقاومت خطا  $R_f = 0.02$  بر روی سیستم اجرا شده و عملکرد درایو مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت، سیستم با حضور یک VFD در نظر گرفته شده که در زمان  $t = 2.1$  ثانیه به شبکه متصل می شود. شبیه سازی زمانی برای دوره زمانی  $t = 2.1$  تا  $t = 2.3$  ثانیه انجام شده است. توان راکتیو در دورخ زمانی خطا  $t = 2.1$  ثانیه الی  $t = 2.3$  ثانیه برای بهبود پروفیل ولتاژ به سیستم تزریق شده است. شکل ۲۱ مقادیر ولتاژ قبل و بعد از اتصال VFD را در حالت حضور خطا در سیستم نشان می دهد. شکل ۱۵-الف نشان می دهد که ولتاژ سیستم در هنگام وقوع خطا در زمان  $t = 2.1$  تا  $t = 2.3$  ثانیه تقریباً از ۵۶۳ ولت تا میزان ۳۵۰ ولت کاهش یافته است که یک کاهش قابل توجه در دامنه ولتاژ است. همچنین شکل ۲۱-ب نشان دهنده شکل موج ولتاژ زمانی که درایو VFD توان راکتیو سیستم را فراهم می آورد است. در این حالت حضور مبدل VSC به گونه ای در نظر گرفته شده است که توان راکتیو مورد نیاز را در فاصله زمانی  $t = 2.1$  تا  $t = 2.3$  ثانیه فراهم آورد. مطابق با شکل ۲۱-ب، مشاهده می شود که دامنه ولتاژ با حضور درایو افزایش یافته است.



شکل ۱۹: جریان منبع تک فاز با و بدون حضور درایوهای VFD

شکل ۱۸-جریان سه فاز سیستم را در حضور درایوهای VFD نشان می دهد. مطابق با شکل، مشاهده می شود با حضور مبدل ها، جبران سازی هارمونیک به خوبی انجام شده و با قطع مبدل از شبکه در زمان  $t = 1.45$  ثانیه، هارمونیک های جریانی مجدداً در شکل موج جریان مشاهده شده است. همچنین مقادیر بالای جریان در زمان های اولیه به خاطر حضور بار در درایو است. در این حالت ملاحظه می شود مقدار جریان در شکل ۱۸ تقریباً دو برابر مقدار جریان در شکل ۱۵ است که به خاطر حضور دو درایو VFDs در سیستم است. این مبدل ها نه تنها جبران کننده مولفه های هارمونیک سیستم بوده اند، توان مورد نیاز بار را نیز از طریق اینورتر فراهم نموده اند. مطابق با شکل ۱۸، باخروج درایو در زمان  $t = 1.45$  ثانیه از مدار خارج می شود، بار درایو نیز از سیستم حذف شده که منجر به تغییر ناگهانی در جریان شده است. شکل ۱۹-جریان تک فاز سیستم را با جبران سازی هارمونیک نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، جبران سازی هارمونیک بدرستی انجام شده و مولفه های مختلف کاهش یافته است. همچنین برای شناسایی مقادیر مولفه های هارمونیک مشابه قسمت های قبل، از تجزیه و تحلیل FFT استفاده شده است. مقادیر مولفه های هارمونیک در حالت با و بدون اتصال مبدل در سیستم در جدول ۳ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود مقدار THD به طور قابل توجهی از ۲۶/۰۳٪ به ۲/۱۸۷٪ کاهش یافته است. همچنین می توان مشاهده نمود که مولفه های هارمونیک  $I_{3th}$ ،  $I_{5th}$ ،  $I_{7th}$ ،  $I_{9th}$ ،  $I_{11th}$ ،  $I_{13th}$  و  $I_{15th}$  به ترتیب از مقادیر ۷/۳٪، ۱۵/۲۲٪، ۳/۹۳٪، ۲/۴۳٪، ۲/۳۸٪، ۱/۱۹٪، ۲/۲۷٪، ۰/۴۹٪، ۰/۳۱٪، ۰/۳۳٪، ۰/۲۴٪، ۰/۲۲٪ و ۰/۱۴٪ کاهش یافته است. همان طور که مشاهده می شود، حضور مبدل ها به طور قابل توجهی مولفه های هارمونیک را کاهش داده است. همچنین نتایج شبیه سازی نشان دهنده عملکرد مناسب مبدل ها و کاهش سطح هارمونیک در حد مجاز بوده است. مقادیر بدست آمده از THD با حضور مبدل ها در سیستم با استانداردهای IEEE و IEC متناسب بوده است.

جدول ۳: نتایج تحلیل FFT به ازای حضور دو درایو VFD

مولفه	درایوها	مولفه هارمونیک با حضور درایوها
Fundamental	100%	100%
<sup>1</sup> 3rd	7.37%	2.27%
<sup>1</sup> 5th	15.22%	0.49%
<sup>1</sup> 7th	3.93%	0.31%
<sup>1</sup> 9th	2.43%	0.33%
<sup>1</sup> 11th	2.38%	0.24%
<sup>1</sup> 13th	0.19%	0.22%

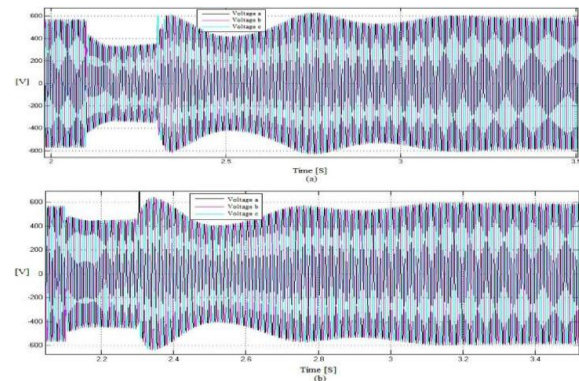
همان طور که در شکل ۲۳-الف نشان داده شده است ولتاژ سیستم بدون حضور جبران سازها کاهش قابل ملاحظه ای یافته است به طوری که دامنه ولتاژ تقریباً از ۵۶۳ ولت به ۳۵۰ ولت کاهش یافته است. مطابق با شکل ۶-۲۳ ب، ملاحظه می شود دامنه ولتاژ سیستم زمانی که از دو درایو VFD استفاده شده است، افزایش قابل توجهی در طول زمان خطا داشته است. مطابق با شکل ۶-۲۳ ب، ملاحظه می شود که در هنگام بروز خطا با حضور دو درایو VFD، دامنه ولتاژ در حدود ۵۱۰ ولت بوده که در محدوده مجاز سیستم الکتریکی کشتی است.

#### نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از درایوهای کنترل فرکانس، به بررسی کنترل توان اکتیو و راکتیو در یک شبکه قدرت کشتی پرداخته شده است. مشاهدات شبیه سازی نشان داده است که با تزریق مولفه های جریان اندازه گیری شده در نقطه اتصال مشترک بار و تولید، می توان مولفه های هارمونیک را حذف نمود. همچنین این نکته به حفظ دامنه ولتاژ سیستم در محدوده مجاز کمک می کند. در ادامه و به منظور بهبود پروفیل ولتاژ در حین بروز خطا، تزریق توان راکتیو مبدل در دوره زمانی خطا مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات شبیه سازی نشان داده است که خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین موجب فروپاشی ولتاژ در تمامی سه فاز شده است که با حضور مبدل ها، ولتاژ سیستم در با کاهش ۶٪، -۱۰٪ نسبت به حالت اولیه بوده که مطابق با استاندارد IEC 6002-101 بوده است. مطابق با نتایج شبیه سازی، نشان داده شده که عملکرد پایدار سیستم الکتریکی کشتی تنها در صورتی امکان پذیر است که دستگاه های PE به عنوان فیلتر اکتیو در شبکه حضور داشته باشند. درایو VFD مورد استفاده در این شبیه سازی از نوع درایو دوطرفه بوده که می تواند مولفه های هارمونیک را از بین برده و ولتاژ باسها را در هنگام بروز خطا، پشتیبانی نماید. از طریق دانش حاصل از این کار، می توان بهبود بیشتری در عملکرد VFD موجود در سیستم الکتریکی کشتی ایجاد نموده و پایداری سیستم را با تبدیل مبدل به عنوان فیلتر فعال بهبود بخشیده که نه تنها جبران کننده هارمونیک در شبکه هستند، بلکه می توانند از ولتاژ سیستم در هنگام خطا نیز محافظت کنند.

#### مراجع

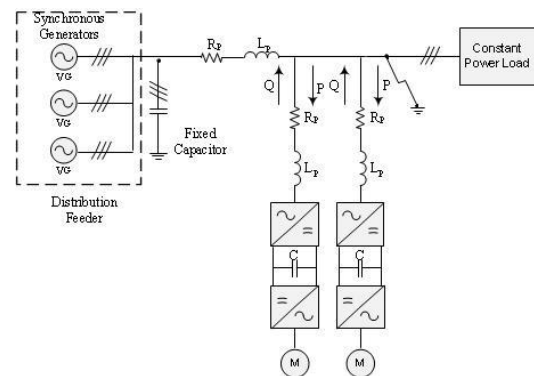
- [1] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, Power Electronics Converters, Applications, and Design, Third Edition, John Wiley, 2019
- [2] Muhammad Rashid, Power Electronics Circuit Devices and Applications, Third Edition, Purdue University, 2020.
- [3] Damir Radan, POWER ELECTRONIC CONVERTERS FOR SHIP PROPULSION ELECTRIC MOTORS, Marine Cybernetics-Energy Management Systems, Technical report, Norway, 2018.
- [4] José Rodríguez, Steffen Bernet, BinWu, Jorge O. Pontt and Samir Kouro, "Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL



شکل ۲۱: (a) خطای سه فاز به زمین بدون جبران سازی توان راکتیو توسط درایو (b) خطای سه فاز به زمین با جبران سازی توان راکتیو توسط درایو VFD

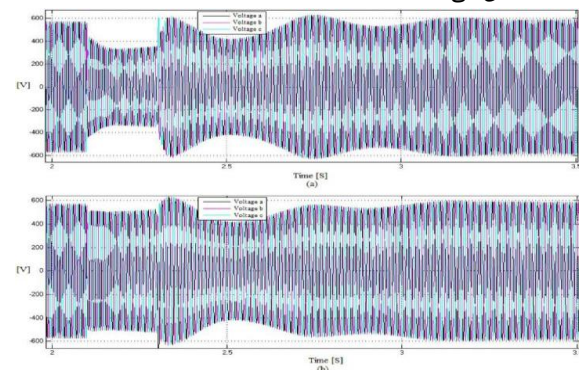
#### بهبود پروفیل ولتاژ با حضور دو درایو VFD

در این سناریو، یک خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین با مقاومت خطا  $R_f$  در سیستم رخ داده و حضور دو درایو VFD در سیستم بررسی شده است. در سناریوی مورد نظر خطا در زمان  $t = 2.1$  ثانیه رخ داده و در زمان  $t = 2.3$  ثانیه برطرف شده است. شبیه سازی سیستم برای زمان  $t = 4$  ثانیه انجام شده است. در این سناریو توان راکتیو در طول زمان خطا میان  $t = 2.1$  ثانیه الی  $t = 2.3$  ثانیه برای بهبود پروفیل ولتاژ در شرایط خطا به سیستم تزریق شده است.



شکل ۲۲: سیستم الکتریکی همراه با دو درایو VFD

شکل ۲۳ دامنه ولتاژ سیستم را قبل و پس از حضور VFD ها در حالت خطا نشان می دهد.



شکل ۲۳: (a) خطای سه فاز به زمین بدون جبران سازی توان راکتیو (b) خطای سه فاز به زمین با جبران سازی توان راکتیو توسط دو درایو VFD



- [22] Keith Corzine, C. A. Whitcomb, S. D. Sudhoff, Performance Characteristics of a Cascaded Two-level Converter, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 2021.
- [23] Atle Rygg Ardal, Espen Skjong, Marta Molinas, Handling System Harmonic Propagation in a Diesel-Electric Ship with an Active Filter, Conference paper, 2018.
- [24] Muhammad Rashid, Power Electronics Circuit Devices and Applications, Third Edition, Purdue University, 2019.
- [25] STATIC FREQUENCY CONVERTER, 100 ÷ 400kVA FC60Hz, Elit Corp., 2019.
- [26] Frequency Converter (10/250 kVA) Operating Manual, Operating Manual, JUD404345, 2020.
- [27] FC series Static Frequency Converters, SIEL Energy Systems, 2017.
- [28] J.M. Prousalidis, N.D. Hatziargyriou, N.D. Hatziargyriou, On Studying Ship Electric Propulsion Motor Driving Schemes, Conference paper, 2018.
- [29] SAHBANI, K. BEN SAAD, M. BENREJEB, Design procedure of a distance based Fuzzy Sliding Mode Control for buck converters, International Conference on Signals, Circuits and Systems, 2018.
- [30] P. Mattavelli, L. Rossetto, G. Spiazzi, P. Tenti, GENERAL-PURPOSE SLIDING-MODE CONTROLLER FOR DC/DC CONVERTER APPLICATIONS, Conference paper, 2019.
- [31] Y. He and F.L. Luo, Sliding-mode control for dc-dc converter with constant switching frequency, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 153, No. 1, January 2016.
- [32] Hao-Ran Wang, Guo-Rong Zhu, Dong-Hua Zhang, Wei Chen, Yu Chen, On The Practical Design of a Single-Stage Single-Switch Isolated PFC Regulator Based on Sliding Mode Control, 2018 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, June, 2019.
- [33] Vietson M. Nguyen, C.Q. Lee, INDIRECT IMPLEMENTATIONS OF SLIDING-MODE CONTROL LAW IN BUCK-TYPE CONVERTERS, IEEE conference, 2020.
- [34] JETND120-HV - DC/DC Converters with high voltage input (standard case 1/4 BRICK), AFP group, 2017.
- [35]
- [36] Fuji IGBT Modules Application Manual, Fuji electric device technology Co, 2017.
- [37] 400 HZ FREQUENCY CONVERTERS FOR CODES B TO F AIRCRAFT, GL standard.
- [38] 400HZ & 28VDC COMBINED GPU, Inverter, Converter and Chopper specification.
- [39] GoHz Frequency Converter User Manual, 50Hz, 60Hz, 400Hz Frequency Converter, GoHz Co.
- [40] Master FC400, 30-125 kVA, Frequency converter, 50/400 Hz, Output voltage 208 V - 3F, Galvanic ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 6, DECEMBER 2017.
- [5] علی شیخزاده تکایی، مسعود جباری، مروری بر تکنولوژی نوین IGBT جهت افزایش کارایی مبدل‌های سوئیچینگ توان بالا، هشتمین کنفرانس مهندسی برق و توسعه پایدار، موسسه آموزش عالی خاوران، بهمن ماه ۱۳۹۲، مشهد، ایران.
- [6] A. Lindemann, A new IGBT with reverse blocking capability, EPE conference, Graz, 2020.
- [7] H. Kapels, D. Drucke, Optimized device concepts for reverse blocking IGBTs, ISPSD conference, Cambridge, UK, April 2019.
- [8] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. Clare, L. Empringham and A. Weinstein, Matrix Converters : A Technology Review.
- [9] Rectifier standards, Traction Rectifier, Secheron, 2016.
- [10] Insulated standard 50A SCR, FAGOR, July 2015.
- [11] Low Voltage Rectifier standard, 5-60kA at 24-125VDC, ABB corporation, 2019.
- [12] Damir Radan, POWER ELECTRONIC CONVERTERS FOR SHIP PROPULSION ELECTRIC MOTORS, Marine Cybernetics-Energy Management Systems, Technical report, Norway, 2018.
- [13] Alf Kåre Ådnanes, Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion, ABB, April 2021.
- [14] Rectifier TYN606 standard, 6A SCRs, ST corporation.
- [15] TONY HOEVENAARS, IAN C. EVANS, ANDY LAWSON, New marine Harmonic Standards, IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE, JAN, 2021.
- [16] Mukund R. Patel, Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy, CRC press, 2012.
- [17] Muhammad Rashid, Power Electronics Circuit Devices and Applications, Third Edition, Purdue University, 2022.
- [18] DAVID M. BROD AND DONALD W. NOVOTNY, Current Control of VSI-PWM Inverters, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-21. NO. 4, MAY/WUNE 2017.
- [19] Fang Zheng Peng, Z-Source Inverter, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 39, NO. 2, MARCH/APRIL 2018.
- [20] V. Salas, E. Olías, M. Alonso, F. Chenlo and A. Barrado1, DC CURRENT INJECTION INTO THE NETWORK FROM PV GRID INVERTERS, Conference Paper, June 2016
- [21] Ralph Teichmann and Steffen Bernet, A Comparison of Three-Level Converters Versus Two-Level Converters for Low-Voltage Drives, Traction, and Utility Applications, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, NO. 3, MAY/JUNE 2020.





- isolation, Applications: airport, military and naval, Battery backup.
- [41] FR-D700 INVERTER, Global Standard, Mitsubishi Electric Co.
- [42] Solid State Frequency Converters, Power Conversion Solutions, PCTI Co.
- [43] GoHz Frequency Converter Selection, GoHz Co.
- [44] Special Products of Frequency Converter and Inverter, Tescom Co.
- [45] INVERTERS, UPS and FREQUENCY CONVERTERS for military, commercial and industrial uses, NOVA Electric Co.
- [46] Product Catalog Frequency Converters, Rexroth Bosch Group.
- [47] ROTARY FREQUENCY CONVERTER, 160 A continuous, 190 A discontinuous, MFC Co.
- [48] ROTARY FREQUENCY CONVERTER, 350 A continuous, 425 A discontinuous, MFC Co.
- [49] Solid State Frequency Converter, Model 3060-MS, PACIFIC Power Source Co, 2012.
- [50] Power Supply CP-ASI/4.0 DC/DC, Primary switch mode DC/DC converter for AS-interface, ABB Co., 2016.
- [51] PRO DC/DC, PRO DCDC 120W 24V 5A, Weidmüller Interface GmbH & Co. KG, 2018.
- [52] Power Converters & Systems, Product Catalog, Synqor Co., Fall 2017.