

# مدل سازی دینامیکی ریزشبه‌ی بهم‌پیوسته‌ی AC/DC در شناورها و تعدیل حالت‌های گذرای ناشی از تغییرات پالسی بار در آن

مصطفی زمانی، آرش دهستانی کلاگر، مهدی مصیبی، محمدرضا علیزاده پهلوانی

چکیده: ریزشبه‌های AC/DC شناورهای مدرن بدلیل افزایش بارهای با توان بالا و توسعه‌ی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی تغییرات چشمگیری داشته‌اند. در این مقاله مدل استخراج شده‌ی ریزشبه، مدل اصلی توسعه‌یافته در چارچوب مرجع dq است و نتایج شبیه‌سازی‌ها تأثیر دینامیکی ناشی از هرگونه ناپایداری بین زیرسیستم‌های AC و DC ریزشبه را نشان می‌دهند. بدین ترتیب با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، زیرسیستم‌های AC/DC ریزشبه در صورت بروز حالت‌های گذرای مانند اتصال کوتاه، کلیدزنی بارهای توان بالا و وقوع قوس الکتریکی، ویژگی‌های گذرای متفاوتی خواهند داشت که منجر به ناپایداری ریزشبه می‌شوند. توانایی ریزشبه در حفظ پایداری تا حد زیادی به میرا کردن نوسان‌های الکترومکانیکی توسط کنترل‌کننده‌های موجود در ریزشبه‌ی AC/DC بستگی دارد که مطالعه و طراحی این کنترل‌کننده‌ها را بسیار مهم می‌سازد. جهت تعدیل حالت‌های گذرای زیرسیستم DC از کنترل‌کننده‌ی حلقه بسته‌ی PI در سیستم ذخیره‌سازی انرژی به منظور کنترل سیکل کاری کلیدهای IGBT مبدل DC/DC استفاده شده است. بنابراین با طراحی مناسب کنترل‌کننده‌ی سیستم ذخیره‌سازی انرژی، حالت‌های گذرا در زیرسیستم DC در صورت بروز ناپایداری‌های ناشی از تغییرات پالسی بار به طور چشمگیری کاهش یافته و سبب تعدیل حالت‌های گذرای ریزشبه خواهد شد. در این مقاله از روش دوم لیاپانوف برای ارزیابی پایداری ریزشبه‌ی AC/DC استفاده شده است.

کلیدواژه: اغتشاش حاصل از کلیدزنی بارها، پایداری ریزشبه، کلیدزنی بارهای پالسی، مدل‌سازی دینامیکی ریزشبه.

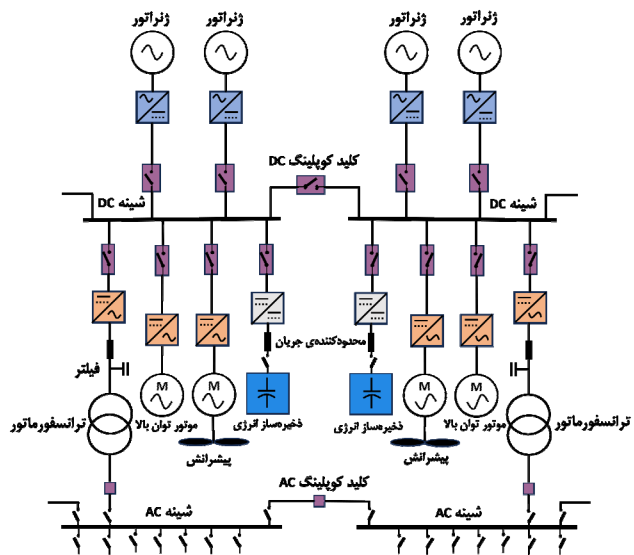
## ۱- مقدمه

امروزه ریزشبه‌های AC/DC بهم‌پیوسته (IPS) بسیار محبوب هستند. این ریزشبه‌ها از نظر کارایی، انعطاف‌پذیری و بکارگیری انواع ادوات الکترونیک قدرت مزایای زیادی در مقایسه با شبکه‌های AC مرسوم دارند و دارای چندین پیکربندی بالقوه با معماری و سطوح ولتاژ مختلف هستند. یک ریزشبه AC/DC شناور شامل واحدهای تولید توان

بازنگری شد. مصطفی زمانی، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: m.zamani6363@gmail.com). آرش دهستانی کلاگر (نویسنده مسئول)، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: a\_dehestani@mut.ac.ir). مهدی مصیبی، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: mosayebi@mut.ac.ir). محمدرضا علیزاده پهلوانی، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: mr\_alizadehp@mut.ac.ir).

اگرچه سیستم‌های قدرت DC شناورها هنوز در مرحله تحقیق و توسعه هستند اما برای طراحی و تحلیل این گونه سیستم‌ها به استانداردها و منابع کمی می‌توان اشاره نمود. استاندارد ۲۰۱۰-۱۷۰۹-۱ IEEE Std به مراحل طراحی و ارزیابی مشکلات فنی می‌پردازد [۴]. همچنین استاندارد

2. Power Generation Modules
3. Fuel Cells
4. Energy Storage Systems
5. Center for Advanced Power Systems
6. Electric Ship Research and Development Consortium



شکل ۱: نمونه‌ای از سیستم قدرت MVDC شناور.

زیرسیستم DC غالب که قسمت تولید توان الکتریکی در سمت زیرسیستم AC وجود دارد (شبکه‌ی MVDC شناورها). بدین ترتیب، ریزشکته‌های بهم‌پیوسته‌ی AC/DC از دیدگاه زیرسیستم غالب مورد بررسی و مدلسازی قرار می‌گیرند. برای مدلسازی ریزشکته‌ی AC/DC، مرجع [۱۴] تنها مدل امپدانس (یکسوسکننده - ژنراتور) را در نظر گرفته که معادلات ژنراتور که بیان ریاضی مهمی از پایداری آن می‌باشد را نادیده گرفته است و یکسوسکننده‌ی تریستوری در حالت پل دیودی و با مدل امپدانس خود نشان داده شده است. در این مرجع تنها پایداری زیرسیستم DC بدون توجه به زیرسیستم AC مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [۱۵] بر روی تحلیل دقیق پایداری زاویه‌ای سیستم با استفاده از مدل دینامیکی خطی شده متمرکز شده است. این نقطه‌ی پایداری عملیاتی اولیه، برای تجزیه و تحلیل پایداری سیگنال کوچک MVAC و همچنین معماری‌های MVDC سیستم قدرت ناحیه‌ای شناور<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این مرجع از مدل حالت پایدار ساده شده‌ی منابع مبدل‌های ولتاژی کمک گرفته است. مرجع [۱۶] تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک را برای ریزشکته‌ی هیبریدی با تجزیه و تحلیل پایداری سیستم بررسی می‌کند. مرجع با نشان دادن مبدل به عنوان یک تابع کلیدزنی سه فاز و در نظر گرفتن منبع تغذیه به عنوان یک منبع ولتاژ ایده‌آل، ریزشکته‌ی AC/DC را در یک چارچوب مرجع  $dq$  توسعه داده است. در روش مرجع [۱۷] تجزیه و تحلیل ریزشکته‌ی بهم‌پیوسته‌ی AC/DC بسیار ساده توصیف می‌شود و دینامیک شبکه‌ی AC با نوسانات ژنراتورهای سنکرون که برای آن حائز اهمیت است را نادیده گرفته است. به علاوه، این روش به تجزیه و تحلیل سیستم‌های دارای ژنراتور سنکرون کمکی نمی‌کند و با چارچوب مرجع ژنراتورهای سنکرون که معمولاً برای سیستم‌های قدرت چند ماشینه بکار می‌رود مطابقت ندارد. مرجع [۱۸] زیرسیستم AC را در قالب یک منابع ولتاژ متعادل سه فاز ایده‌آل با اندوکتانس کموتاسیون ثابت نشان داده است. مرجع [۱۹] ژنراتورهای سنکرون AC را با مدل‌های DC معادل آنها برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌ی مبدل‌های DC-DC نشان داده است. مرجع [۲۰] یک مدل سیگنال کوچک از یک سیستم MVDC چند ماشینه ارائه می‌کند که ژنراتورهای سنکرون AC را توسط یک منبع ولتاژ DC که با المان‌های  $RL$  سری شده‌اند ارائه می‌کند.

IEEE Std. ۱۶۶۲-۲۰۰۸ دستورالعمل‌ها و مشخصات مبدل‌های قدرت را که باید در سیستم الکتریکی شناورها مورد استفاده قرار گیرند پوشش می‌دهد [۵]. در مورد سیستم‌های قدرت ناحیه‌ای می‌توان به مراجع IEEE Std. ۱۸۲۶-۲۰۱۲ و MIL Std. ۳۱۳۹۹-۳۰۰ مراجعه نمود [۶] و [۷]. در مورد شناورهای الکتریکی پهلو گرفته در اسکله و تغذیه‌ی آنها از سیستم قدرت سراسری مرجع IEC/IEEE Std. ۳۱۳۹۹-۱ مفید است [۸].

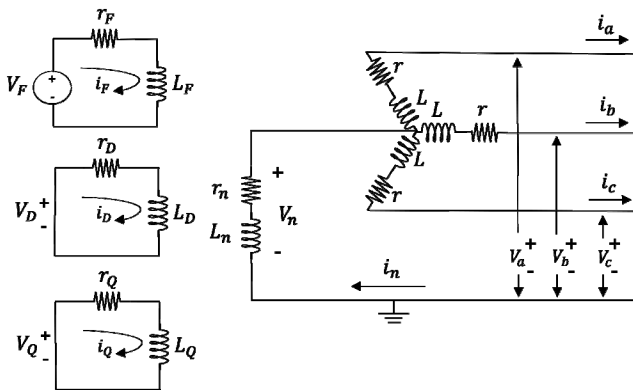
موتورهای توان بالا به‌صورت گسترده در شناورها مورد استفاده قرار می‌گیرند، به طوری که حدود ۷۰٪ از توان الکتریکی تولیدی ژنراتورها را به خود اختصاص می‌دهند. افت یا دره‌ی ولتاژی ناشی از جریان راه‌اندازی موتورهای توان بالا یکی از دلایل اصلی افت ولتاژ و از مدار خارج شدن تجهیزات الکتریکی حساس شناور است. این پدیده باید در طراحی شناور به دقت در نظر گرفته شود تا با استاندارد IEC ۶۱۰۰۰-۳-۴ مطابقت داشته باشد [۹].

قوس الکتریکی با آزاد شدن انرژی ناشی از یک خطای الکتریکی تولید می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود اثرات خطرناک قوس الکتریکی بر روی پرسنل در شبکه‌های AC و DC به حداقل برسد. در این راستا، استاندارد IEEE Std. ۱۵۸۴-۲۰۰۲ تکنیک‌هایی را برای طراحان و اپراتورهای تاسیسات الکتریکی در تعیین فاصله ایمن ناشی از قوس الکتریکی AC و اثرات انرژی آن بر روی کارکنان در معرض آن ارائه می‌دهد [۱۰]. با این حال، هنوز هیچ استاندارد یا دستورالعمل جامعی برای تخلیه‌ی قوس الکتریکی DC وجود ندارد. روشی برای تخمین انرژی ناشی از قوس الکتریکی DC در استاندارد مربوط به IEEE منتشر شده است [۱۱]. این روش بر این مفهوم استوار است که حداکثر توان قوس DC زمانی رخ می‌دهد که ولتاژ قوس الکتریکی نصف ولتاژ سیستم باشد. با این وجود، روش‌های کاهش قوس الکتریکی در پیوست B استاندارد IEEE Std. ۱۷۰۹-۲۰۱۰ ذکر شده است [۴].

یکی از خصوصیات مهم ریزشکته‌های AC/DC فقدان زمین مؤثر است که سیستم اتصال زمین شناورها را به یک چالش بزرگ تبدیل می‌کند. در صورت زمین نشدن ریزشکته‌ی شناور، جریان نشتی و جریان خطای فاز به زمین می‌تواند اندک باشد که باعث تداوم کارکرد منبع تغذیه در صورت بروز یک خطای فاز به زمین می‌شود. به دلیل جریان کم خطا، تشخیص و مکان‌یابی عیب دشوار است. علاوه بر این جریان‌های نشتی باعث ایجاد ولتاژهای باقیمانده بر روی تجهیزات الکتریکی می‌کنند که باید این تجهیزات با سطح بالایی از عایق‌بندی تجهیز شوند تا خطرات جانی برای پرسنل ایجاد نکند [۱۲]. مطابق استاندارد IEEE Std. ۱۷۰۹-۲۰۱۰ دو روش برای زمین کردن زیرسیستم DC دوقطبی شناور وجود دارد: (۱) زمین کردن با مقاومت بالا (۲) زمین کردن مستقیم به یک نقطه‌ی خنثی [۴].

شکل ۱، نمونه‌ای از یک ریزشکته‌ی بهم‌پیوسته‌ی شناور که شامل ژنراتورهای سنکرون و موتورهای پیشران، بارهای موتوری توان بالا و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی است را نشان می‌دهد که به‌وضوح دیده می‌شود که موتورهای توان بالا سهم بالایی از توان الکتریکی ژنراتور را به خود اختصاص می‌دهند [۱۳].

مدل‌سازی و کنترل ریزشکته‌های بهم‌پیوسته‌ی AC/DC از دهه‌ی گذشته موضوع مورد توجه محققین سیستم‌های قدرت شناورها بوده است. این سیستم را می‌توان از دو منظر بررسی نمود: (۱) شبکه‌هایی که دارای زیرسیستم AC غالب هستند، مانند ریزشکته‌ی AC/DC با تعداد محدودی از سامانه‌های خورشیدی متصل به آن (۲) شبکه‌هایی با



شکل ۳: شماتیک مداری ژنراتور سنکرون.

## ۲- مرور ادبیات و پژوهش‌های مرتبط

در این بخش مدل ریاضی یک ریزشبه‌ی بهم‌پیوسته‌ی AC/DC مطابق شکل ۲، توسعه داده شده که در آن ژنراتور سنکرون که توسط یک خط انتقال به مبدل یکسو ساز ترنستوری شش پالس متصل شده است و زیرسیستم‌های AC و DC را از طریق آن به یکدیگر متصل می‌کند تشکیل شده است. شکل موج ولتاژ و جریان خروجی DC یکسوکننده با استفاده از یک فیلتر  $RL$  سری و یک سیستم ذخیره‌ساز خازنی فیلتر شده و به بار مقاومتی  $R$  داده می‌شود. همچنین به شینه‌ی اصلی AC، یک بار  $RC$  موازی که هارمونیک‌های ناشی از ژنراتور و بارهای AC را فیلتر می‌کند متصل شده است [۲۱].

### ۲-۱ مدل ژنراتور سنکرون

ژنراتور سنکرون ماشین دواری است که دارای یک استاتور با سه سیم‌پیچ مستقل  $a$ ،  $b$  و  $c$  که با موقعیت  $120^\circ$  از هم قرار گرفته‌اند و دارای روتوری که تعداد معینی قطب مغناطیسی که توسط جریان DC تغذیه می‌شوند تشکیل شده است. میدان مغناطیسی کوپلینگی بین سیم‌پیچ‌های ژنراتور سنکرون تابعی از موقعیت روتور است. از این رو، شارهای پیوندی بین سیم‌پیچ‌ها نیز تابعی از موقعیت روتور می‌باشند.

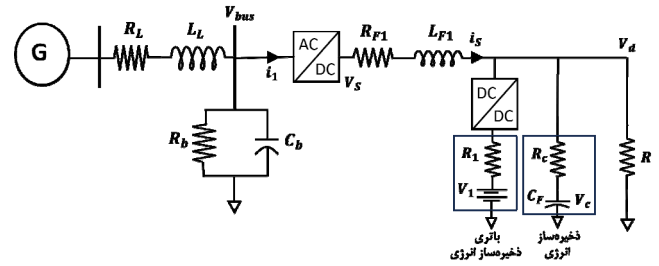
مطابق شکل ۳، ژنراتور سنکرون سیستمی با شش مدار است که سه مدار آن برای سیم‌پیچ‌های استاتور، یکی برای میدان تحریک و دو مدار دیگر به سیم‌پیچ‌های دمپر اختصاص دارد [۲۲]. بطور کلی سیم‌پیچ‌های میراکننده (دمپر) جهت مستهلک کردن جریان‌های فوکوی جاری شده در قسمت آهنی قطب‌های روتور ژنراتور سنکرون بکار می‌روند و می‌توانند باعث کاهش ناچیزی در حالت‌های گذرای زیرسیستم AC در ریزشبه‌ی شناور شوند.

علاوه بر اندوکتانس‌های متقابل بین هر جفت سیم‌پیچ، هر یک از این سیم‌پیچ‌ها دارای مقاومت و القای خودی نیز می‌باشند. مدل ژنراتور سنکرون که از طریق خط انتقال به شینه‌ی AC متصل شده است به راحتی از قانون ولتاژ کیرشهف بدست می‌آید [۲۲].

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ V_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} + L_L U_3 & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} L_{SS} + L_L U_3 & L_{SR} \\ L'_{SR} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

$U_3$  ماتریس یکّه با بُعد سه است.

از آنجایی که پارامترهای (۱) متغیر با زمان هستند و تجزیه و تحلیل آنها را با پیچیدگی روبه‌رو می‌کند ما مطابق (۲) با استفاده از تبدیل پارک،

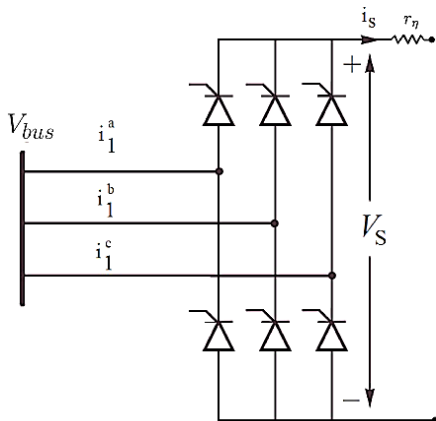


شکل ۴: ریزشبه‌ی بهم‌پیوسته‌ی AC/DC مورد مطالعه.

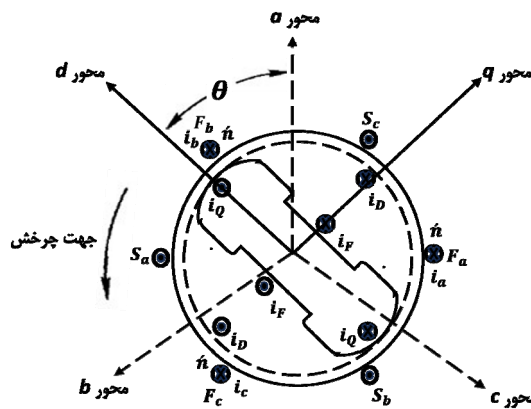
این مقاله بر روی سه هدف اصلی تمرکز دارد:

۱. توسعه‌ی مدل دینامیکی ریزشبه‌ی بهم‌پیوسته‌ی AC/DC.
۲. ارزیابی پایداری دینامیکی بین زیرسیستم‌های AC و DC.
۳. طراحی سیستم کنترلی زیرسیستم DC جهت تعدیل حالت‌های گذرا.

هر جزء ریزشبه‌ی AC/DC مانند ژنراتور سنکرون، مبدل یکسوکننده، فیلترها و سیستم ذخیره سازی انرژی توسط یک مدل دینامیکی مناسب توصیف شده است. این مدل تحلیلی همچنین کاربرد مفاهیم تئوری کنترل پیشرفته برای جبران‌سازی حالت‌های گذرا در سیستم را تسهیل می‌کند. این مدل دینامیکی می‌تواند برای مطالعات شبیه‌سازی در زبان برنامه‌نویسی Matlab در حوزه زمان و فرکانس پس از خطی‌سازی با استفاده از ابزارهای حوزه فرکانس بکار برده شود. از آنجایی که سیستم‌های فیزیکی واقعی شامل ادوات و تجهیزات AC و DC هستند، یک رویکرد مناسب برای ادغام این دو زیرسیستم استفاده از تبدیل  $dq$  است که معمولاً برای تحلیل حالت‌های گذرای ژنراتورهای سنکرون بکار برده می‌شود. مهمترین نیاز در این زمینه، توسعه‌ی یک مدل ریاضی مبدل برای مبدل است که زیرسیستم‌های AC و DC را به یکدیگر مرتبط می‌کند. این مقاله یک مدل  $dq$  از مبدل را با استفاده از چارچوب مرجعی که معمولاً برای ژنراتورهای سنکرون مورد استفاده قرار می‌گیرد توصیف می‌کند. چارچوب مرجع  $dq$  بررسی برهمکنشی دینامیکی بین زیرسیستم‌های AC و DC را که توسط یک مبدل به هم متصل شده‌اند را تسهیل می‌نماید. دلیل اینکه مدل دینامیکی توسعه‌یافته بسیار غیرخطی است از مفاهیم پایداری لیاپانوف برای ارزیابی پایداری سیستم استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هرگونه اغتشاش در شینه‌ی بار DC مانند کلیدزنی بارهای پالسی توان بالا، اتصال کوتاه، قوس‌الکتریکی و کلیدزنی ژنراتور سنکرون در غیاب یک کنترل‌کننده مناسب باعث ایجاد حالت‌های گذرای در شینه‌ی AC می‌گردد [۳]. به طور مشابه با کلیدزنی یک بار دینامیکی بزرگ در زیرسیستم AC، باعث ایجاد نوسانات ولتاژ در شینه‌ی زیرسیستم DC می‌گردد که این امر نیازمند طراحی سیستم کنترلی مناسب برای بهبود پایداری ریزشبه‌ی است. ساختار این مقاله بصورت زیر سازماندهی شده است: بخش ۲، اولین مدل دینامیکی ریزشبه‌ی بهم‌پیوسته‌ی AC/DC را با استفاده از چارچوب مرجع  $dq$  مبتنی بر ژنراتور سنکرون توسعه می‌دهد. بخش ۳، کنترل‌کننده‌ی زیرسیستم DC را به همراه طراحی مبدل DC/DC توصیف می‌کند. بخش ۴، تجزیه و تحلیل پایداری کامل سیستم را بر اساس روش دوم یا مستقیم نظریه‌ی لیاپانوف ارائه می‌دهد. بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی حالت‌های گذرای ناشی از بارهای پالسی بر روی شینه‌های AC و DC را ارائه می‌کند و بخش ۶ به نتیجه‌گیری مقاله اختصاص دارد.



شکل ۵: مدار مبدل تمام موج کنترل‌پذیر تریستوری.



شکل ۴: محور دقت‌زناور سنکرون.

سیستم را در چارچوب مرجع دوار dq در نظر می‌گیریم و رابطه‌های بانداوکنانس‌های متغیر با زمان را حذف می‌کنیم. با توجه به شکل ۴، محور d در جهت محور قطبی روتور قرار دارد که محور q به اندازه‌ی ۹۰° از محور d عقب‌تر است.

$$X_{odq} = PX_{abc}$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

با کاربرد تبدیل پارک مطابق (۲) و با استفاده از آن در (۱)، مدل دینامیکی ژنراتور سنکرون متصل شده به شینه‌ی AC از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$\dot{\mathbf{i}} = -\omega_B \mathbf{L}^{-1} [(\mathbf{R} + \omega \mathbf{N})\mathbf{i} + \mathbf{V}], \mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_{bus,d} \\ -\sqrt{3}R_F E \\ KM_F \\ \cdot \\ V_{bus,q} \\ \cdot \end{bmatrix}, \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_a + R_L & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & R_F & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & R_D & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & R_a + R_L & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & R_Q \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & L_q + L_L & kM_Q \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -(L_d + L_L) & -kM_F & -kM_D & 0 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_d + L_L & kM_F & kM_D & \cdot & \cdot \\ kM_F & L_F & M_R & \cdot & \cdot \\ kM_D & M_R & L_D & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & L_q + L_L & kM_Q \\ \cdot & \cdot & \cdot & kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

معادلات سرعت و گشتاور زاویه‌ای ژنراتور سنکرون با تبدیل در

چارچوب مرجع dq از روابط زیر به‌دست می‌آید.

$$\dot{\omega} = -\frac{L_d i_q i_d}{3\tau} - \frac{kM_F i_q i_F}{3\tau} - \frac{kM_D i_q i_D}{3\tau} + \frac{L_q i_d i_q}{3\tau} + \frac{kM_Q i_d i_Q}{3\tau} - \frac{D\omega}{\tau} + \frac{T_m}{\tau} \quad (4)$$

$$\dot{\delta} = \omega_B (\omega - 1) \quad (5)$$

در (۴)،  $\tau = 2H$  که اینرسی ثابت روتور است. با توجه به روابط فوق مدل کامل ژنراتور سنکرون توصیف شده است [۲۱].

### ۲-۲ مدل مبدل تریستوری شش پالسه

مطابق شکل ۵، یک مبدل شش‌پالسه‌ی تمام پُل کنترل‌پذیر تریستوری را که شامل مقاومت  $r_\eta$  که بدلیل هم‌پوشانی کموتاسیونی در مدارهای القایی باعث افت ولتاژ در سمت زیرسیستم DC می‌شود را در نظر می‌گیریم.

$$r_\eta = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (6)$$

که  $L_{eq}$  و  $\omega$ ، به ترتیب اندوکنانس و سرعت زاویه‌ای سمت AC مبدل تریستوری هستند. برای یک سیستم پایدار مقدار مقاومت  $r_\eta$  را ثابت فرض می‌کنیم و تغییرات  $\omega$  در طول دوره‌ی حالت‌های گذرا معمولاً کم می‌باشد.

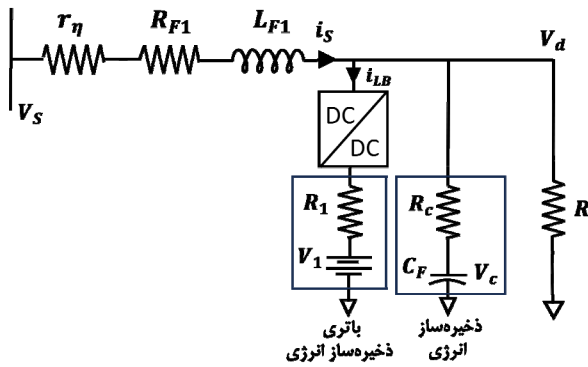
برای ترکیب مقادیر پارامترهای زیرسیستم‌های AC و DC، مبدل تریستوری باید به عنوان یک تابع کلیدزنی پرودیکی در چارچوب مرجع dq توصیف گردد. با نادیده گرفتن اثرات کموتاسیونی، مبدل تریستوری باید به عنوان یک سوئیچ ایده‌آل سه فاز کنترل شده با یک تابع سوئیچینگ مطابق شکل ۶ در نظر گرفته شود.

$\alpha$  زاویه‌ی آتش تریستورها و  $\varphi$  زاویه فاز ولتاژ شینه AC ورودی است [۲۴]. مطابق شکل ۱، سیگنال کلیدزنی  $S_a$  که خروجی یکسوکننده‌ی تریستوری است می‌تواند توسط سری فوریه‌ی زیر توصیف گردد.

$$S_a = \sum_{k=1,5,7,\dots}^{\infty} \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{(-1)^{L+1}}{k} \times (-2 \sin k \omega t) \quad (7)$$

$$k = 6L \pm 1 (L = 0, 1, 2, \dots, k > 0)$$

در این مورد تنها مؤلفه‌ی اصلی یعنی  $k = 1$  را برای خروجی سیگنال کلیدزنی  $S_a$  در مبدل شش پالسه‌ی تریستوری در نظر می‌گیریم [۲۳]. میزان هارمونیک کل در کاربردهای الکترونیک قدرت توسط سوئیچینگ مبدل‌ها که عموماً توسط فیلترها تعدیل پیدا می‌کنند تعریف



شکل ۷: مدار زیرسیستم DC با باتری ذخیره‌سازی انرژی.

در چارچوب مرجع  $dq$  داریم [۳].

$$\dot{V}_{bus,d} = -\frac{V_{bus,d}}{R_b C_b} + \frac{1}{C_b} i_d - \frac{1}{C_b} i_{\nu,d} - \omega V_{bus,q} \quad (13)$$

$$\dot{V}_{bus,q} = -\frac{V_{bus,q}}{R_b C_b} + \frac{1}{C_b} i_q - \frac{1}{C_b} i_{\nu,q} - \omega V_{bus,d}$$

با جایگذاری  $i_{1,q}$  و  $i_{1,d}$  از (۱۱) در (۱۳) و با تبدیل پریونیت داریم.

$$\dot{V}_{bus,d} = \frac{\omega_B}{C_b} \left[ i_d - \frac{V_{bus,d}}{R_b} - S_d i_s - \omega C_b V_{bus,q} \right] \quad (14)$$

$$\dot{V}_{bus,q} = \frac{\omega_B}{C_b} \left[ i_q - \frac{V_{bus,q}}{R_b} - S_q i_s - \omega C_b V_{bus,d} \right] \quad (15)$$

### ۲-۴ مدل فیلتر و سیستم ذخیره‌سازی انرژی

مطابق شکل ۷، با استفاده از قوانین ولتاژ و جریان کیرشف در زیرسیستم DC، مدل ریاضی آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۳].

$$V_d = V_S - r_\eta i_s - R_{F1} i_s - L_{F1} \frac{di_s}{dt} \quad (16)$$

$$i_s = i_{LB} + C_F \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_d}{R}$$

که  $R$  نشاندهنده مقاومت بار DC و ولتاژ شینه DC است که با توجه به (۱۷) توصیف می‌گردد.

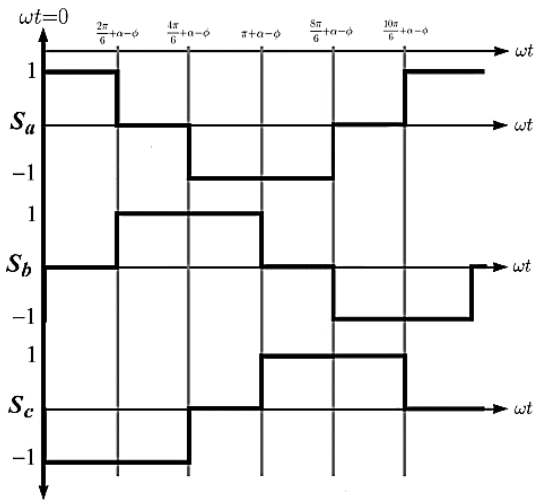
$$V_d = \frac{RR_c}{R+R_c} (i_s - i_{LB}) + \frac{R}{R+R_c} V_c \quad (17)$$

اکنون با ترکیب (۱۱) با مدل فیلتر، سیستم ذخیره‌سازی انرژی و مدل DC/DC طبق (۱۶) و (۱۷) و تبدیل پریونیت داریم.

$$\dot{i}_s = \frac{\omega_B}{L_{F1}} \left[ S_d V_{bus,d} + S_q V_{bus,q} - i_s \left( r_\eta + R_{F1} + \frac{RR_c}{R+R_c} \right) + \frac{RR_c}{R+R_c} i_{LB} - \frac{V_c R}{R+R_c} \right] \quad (18)$$

$$\dot{V}_c = \frac{\omega_B}{C_F (R+R_c)} [R(i_s - i_{LB}) - V_c] \quad (19)$$

مطابق شکل ۷، جریان  $i_{LB}$  در روابط (۱۸) و (۱۹)، جریان ورودی مدل DC/DC که به عنوان کنترل‌کننده زیرسیستم DC شناخته می‌شود تعریف می‌گردد. مدل دینامیکی کامل ریزشبه‌ی AC/DC توسط (۳)، (۵)، (۱۴)، (۱۵)، (۱۸) و (۱۹) توصیف می‌شود. واضح است که مدل دینامیکی ریزشبه‌ی AC/DC غیرخطی است و بیانگر ارتباط دینامیکی



شکل ۱: سیگنال سوئیچینگ یکسوکننده‌ی تمام پُل ترستوری.

می‌شوند. پس با چشم‌پوشی از میزان هارمونیک‌ها در ریزشبه‌ی، توابع سوئیچینگ مدل ترستوری شش پالسه توسط (۸) توصیف می‌گردد.

$$S_{abc} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \alpha + \varphi) \\ \cos(\omega t - \alpha + \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t - \alpha + \varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

رابطه بین ترمینال ورودی، یعنی ترمینال شینه‌ی AC و ترمینال خروجی مدل زیرسیستم DC را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$i_{1,abc} = S_{abc} i_s \quad (9)$$

$$V_S = S_{abc}^T V_{bus,abc}$$

همانطور که مؤلفه‌های متغیر با زمان در مدل‌سازی ژنراتور سنکرون با استفاده از تبدیل  $dq$  حذف شده‌اند، مدل مدل نیز باید مستقل از زمان باشد. اکنون با تبدیل  $dq$  و با استفاده از ماتریس تبدیل پارک، تابع کلیدزنی (۸) به صورت زیر در می‌آید.

$$S_{dq} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} -\sin(\delta + \alpha - \varphi) \\ \cos(\delta + \alpha - \varphi) \end{bmatrix} \quad (10)$$

به‌طور مشابه با اعمال تبدیل  $dq$  در (۹) داریم.

$$i_{1,0dq} = S_{odq} i_s \quad (11)$$

$$V_S = S_{odq}^T V_{bus,odq}$$

با ترکیب روابط و نتایج فوق داریم.

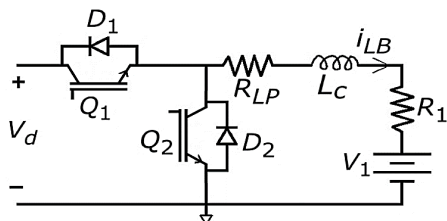
$$V_S = \frac{\sqrt{3}}{\pi} V_{bus,LL} \cos(\alpha - \varphi) \quad (12)$$

که ارتباط ولتاژهای ورودی و خروجی مدل ترستوری شش پالسه توسط (۱۲) توصیف می‌شود [۲۱].

### ۲-۳ مدل شینه‌ی AC

شینه‌ی AC به عنوان نقطه‌ی اتصال ژنراتور سنکرون و مدل ترستوری شناخته می‌شود که می‌توان بارهای محلی AC را نیز به آن متصل نمود. با کاربرد قانون جریان کیرشف در شینه‌ی AC و تبدیل آن





شکل ۸: مدار مبدل DC/DC با باتری ذخیره‌ساز انرژی.

حال در ادامه به طراحی کنترل‌کننده‌ی مبدل DC/DC در سیستم ذخیره‌سازی انرژی می‌پردازیم.

مطابق شکل ۸، مبدل DC/DC از نوع غیر ایزوله و دارای دو کلید IGBT است. کلیدهای IGBT بصورت مکمل با یکدیگر سوئیچ می‌شوند و همانطور که در بخش قبل ذکر گردید مبدل DC/DC می‌تواند در دو حالت باک و بوست کار نماید. ضریب وظیفه<sup>۲</sup> را می‌توان به راحتی با کنترل سیگنال‌های PWM مورد استفاده برای کلیدزنی IGBT کنترل نمود. بنابراین یک سیگنال ژنراتور PWM ساده در این مقاله در نظر گرفته شده است. شکل ۹ سیگنال ژنراتور PWM را با یک کنترل‌کننده‌ی تناسبی و انتگرال‌گیر PI نشان می‌دهد که دارای ثابت زمانی بسیار کم  $\tau_c$  است. کنترل‌کننده خطای بین ولتاژ شینه DC و ولتاژ مرجع DC را کنترل می‌کند و بسته به خطای مورد نظر، ضریب وظیفه تنظیم می‌شود تا مبدل در حالت کاری باک یا بوست کار نماید. مطابق انتظار، هنگامیکه ولتاژ شینه DC از ولتاژ مرجع شروع به افزایش می‌کند، مبدل DC/DC به عنوان مبدل باک کار می‌کند و توان اضافی را از شینه DC به باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی هدایت و به تثبیت ولتاژ زیرسیستم کمک می‌نماید. از سویی دیگر، بدلیل تعدیل توان در شینه‌ی زیرسیستم DC، زمانیکه ولتاژ شینه DC از مقدار مرجع خود کاهش می‌یابد، مبدل به عنوان مبدل بوست عمل می‌کند. سپس باتری‌ها توسط مبدل DC/DC جریان را به شینه DC انتقال می‌دهند تا به دامنه‌ی ولتاژ زیرسیستم DC به مقدار مورد انتظار کمک کنند. بنابراین، حالت‌های شارژ و دشارژ باتری به ترتیب به مُد کاری باک و بوست مبدل DC/DC بستگی دارد [۵]. حالت شارژ باتری‌ها عمدتاً به فعال بودن کلید  $Q_1$  و بستگی دارد آن به فعال بودن کلید  $Q_2$  بستگی دارد [۲۶].

توجه به این نکته ضروریست که فرکانس سوئیچینگ مبدل DC/DC بستگی به نوع اغتشاشات و حالت‌های گذرای زیرسیستم DC دارد که توسط کنترل‌کننده تنظیم می‌گردد.

توصیف ریاضی دقیق سیگنال ژنراتور PWM با کنترل‌کننده‌ی PI را می‌توان از شکل ۹ به صورت معادله‌ی دیفرانسیل زیر استخراج نمود [۳]:

$$\begin{aligned} \dot{D}_1 &= K_{ci} (V_d - V_{d,ref}) \\ \dot{D} &= \frac{1}{\tau_c} [(V_d - V_{d,ref}) K_{cp} + D_1 - D] \end{aligned} \quad (20)$$

از دیدگاه طراحی کنترل‌کننده مناسب، می‌توان از کنترل‌کننده‌های پیچیده و کارآمدتری جهت سوئیچینگ بهینه‌تر که باعث کاهش تلفات کلیدهای مبدل DC/DC می‌شود بهره گرفت. می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته‌تر مانند کنترل پیش‌بین برای کنترل مبدل DC/DC جهت سوئیچینگ بهینه‌تر و کاهش تلفات ناشی از آن استفاده نمود و همچنین حالت‌های گذرای زیرسیستم DC را کاهش و پایداری

زیرسیستم‌های AC و DC می‌باشد [۳].

به‌طور کلی امروزه از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ترکیبی برای کاهش بیشتر حالت‌های گذرا و افزایش پایداری ریزشکته‌های AC/DC بهره می‌گیرند که متداول‌ترین آنها، سیستم ترکیبی مبتنی بر باتری‌ها و ابرخازن‌ها است. ابرخازن‌ها شکاف بین باتری‌ها و خازن‌های معمولی را پر می‌کنند. برخلاف خازن‌های معمولی که به دلیل خرابی در دی الکتریک، ظرفیت ذخیره‌سازی آنها محدود می‌شود، ابرخازن‌ها حد بالای ولتاژ را تحمل می‌کنند و می‌توانند حداقل ۱۵۰۰۰ برابر چگالی ذخیره‌سازی انرژی بیشتر از آنچه در فناوری خازن معمولی قابل دستیابی است ارائه دهند [۲۴]. بنابراین می‌توان از آنها به عنوان تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی در شناورها استفاده کرد. بدلیل مقاومت داخلی پایین، خازن‌ها دارای یک ثابت زمانی کوچکی هستند که آنها را قادر می‌سازد نرخ سرعت شارژ/دشارژ بالایی داشته و چگالی توان بالایی ایجاد کنند. با این حال، چگالی انرژی در ابرخازن‌ها برخلاف باتری‌ها نسبتاً کم است. در نتیجه با ترکیبی از ابرخازن‌ها و باتری‌ها نه تنها می‌توان تقاضای توان برای بارهای بحرانی و حساس را برآورده کرد، بلکه تنش‌های حداکثر توان روی سلول‌های باتری را نیز کاهش و تقاضای پیک توان ناشی از بارهای پالسی در شناورهای نظامی را برآورده کنند [۱].

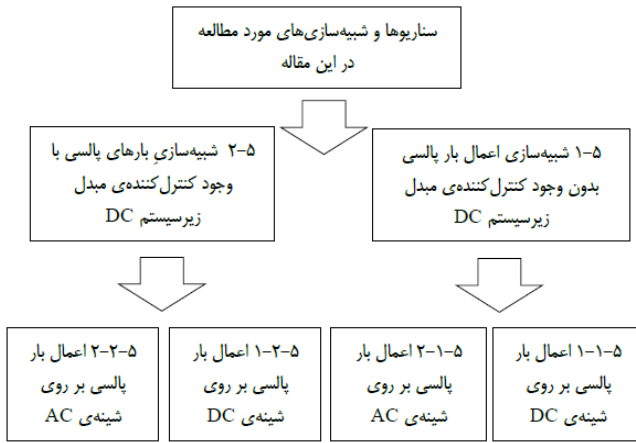
در مقایسه با باتری‌ها به عنوان سیستم ذخیره‌سازی انرژی، پیل سوختی وسیله‌ای شیمیایی است که مستقیماً انرژی شیمیایی سوخت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. پیل‌های سوختی به نوعی شبیه باتری‌ها هستند اما نیازی به شارژ شدن توسط اتصالات خارجی ندارد، زیرا از اکسیژن به عنوان کاتالیزور استفاده می‌کند. تا زمانی که سوخت داخل دستگاه باشد، قادر به تولید انرژی هستند. این به عنوان یکی از امیدوار کننده‌ترین فناوری‌های الکتریکی شناخته می‌شود زیرا دارای حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای و بدون آلودگی صوتی می‌باشند. با این حال، چالش در تولید، ذخیره‌سازی و هزینه‌های بالا در تعمیر و نگهداری آن را به اولویت پایین‌تری برای ریزشکته‌های AC/DC مورد استفاده در شناورها تبدیل می‌کند [۲۵].

### ۳- کنترل‌کننده‌ی زیرسیستم DC

کنترل‌کننده‌های محرک اصلی و سیستم تحریک ژنراتور سنکرون، حالت‌های گذرا در زیرسیستم AC را بهبود می‌بخشند اما بهبودی در حالت‌های گذرای زیرسیستم DC جزئی است. لذا در این بخش، با اضافه کردن یک کنترل‌کننده جهت تعدیل حالت‌های گذرای زیرسیستم DC آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم. بطور خاص باتری‌های ذخیره‌سازی انرژی به یک کنترل‌کننده اضافه می‌شوند که حالت‌های شارژ و دشارژ باتری‌ها هنگام ایجاد گذراهای زیرسیستم DC را تنظیم می‌کند. با توجه به شکل، باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی به یک مبدل DC/DC که توان الکتریکی را در دو جهت انتقال می‌دهد متصل می‌شوند و قابلیت کنترل بسیار خوبی را بر روی باتری‌ها فراهم می‌نماید. باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی با تأمین توان مورد نیاز ریزشکته یا جذب توان اضافی از آن می‌توانند در دو حالت باک<sup>۱</sup> و بوست<sup>۲</sup> کار کنند و مبدل DC/DC توزیع توان را در هر دو جهت می‌تواند تضمین نماید. کنترل‌کننده‌ی مبدل DC/DC حالت‌های عملکردی مبدل را جهت تنظیم توزیع توان در سیستم کنترل می‌کند [۳].

1. Buck

2. Boost



شکل ۱۰: سارنویهای شبیه‌سازی مورد مطالعه در این مقاله.

دارند. این نوع بارها به عنوان بارهای پالسی دسته‌بندی می‌شوند. بارهای پالسی نه تنها دارای پیک توان و نرخ افزایشی بالا هستند بلکه تأثیر قابل توجهی بر ولتاژ شینه و پایداری زیرسیستم‌های AC و DC دارند. بطور کلی، کلیدزنی بارهای پالسی توان بالا می‌تواند منجر به افت یا دره‌ی ولتاژی در ریزشبه‌ی AC/DC شناور شوند. دره‌ی ولتاژی می‌تواند سبب ناپایداری و از مدار خارج شدن بارهای حساس و بحرانی شود که از شینه‌های زیرسیستم‌های AC و DC تغذیه می‌کنند. بنابراین باید از استراتژی‌های مناسب جهت کاهش حالت‌های گذرای ناشی از اعمال بارهای پالسی و انواع اغتشاشات کنترل‌نشده‌ی ریزشبه‌ی استفاده نمود. جداسازی منابع تغذیه‌ی بارهای حساس و بحرانی از بارهای پالسی یکی از استراتژی‌های مناسب برای حفظ پایداری ریزشبه‌ی AC/DC است که باید برای سیستم قدرت جزیره‌ای شناور مدنظر قرار بگیرد.

بار پالسی ایده‌آل در یک دوره زمانی به صورت (۲۳) برابر است با [۱۲]:

$$P_p(t) = \begin{cases} P_{p,max} & t < t < t + t_p \\ \cdot & others \end{cases} \quad (23)$$

دامنه توان بار پالسی و مدت زمان بار پالسی را توصیف می‌کند.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

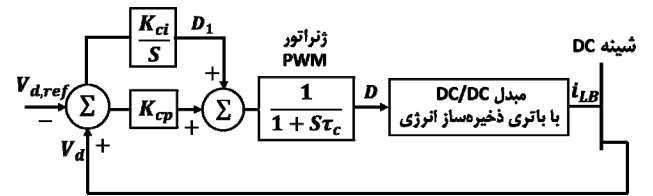
مطابق شکل ۲، ریزشبه‌ی AC/DC مورد مطالعه در محیط نرم افزار Simulink/MATLAB شبیه‌سازی شده است و نتایج شبیه‌سازی ارتباط دینامیکی بین زیرسیستم‌های AC و DC در حالت‌های گذرای ناشی از بار پالسی بر روی شینه‌های AC و DC را به اثبات می‌رساند و نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌ی سیستم ذخیره‌سازی انرژی در تعدیل حالت‌های گذرای زیرسیستم DC بسیار مؤثر و کارآمد است.

پارامترهای ریزشبه‌ی AC/DC مورد مطالعه در جدول قسمت پیوست مقاله آمده است. شکل ۱۰، سارنویهای شبیه‌سازی مورد مطالعه در این مقاله را به صورت اجمالی نشان می‌دهد.

## ۱-۵ شبیه‌سازی بارهای پالسی بدون وجود کنترل‌کننده‌ی مبدل زیرسیستم DC

### ۱-۱-۵ اعمال بار پالسی بر روی شینه‌ی DC

برخی از بارهای خاص با توان بالا در شناورها وجود دارند که می‌توان به پیشران‌های شناور، کمپرسورهای تهویه مطبوع و سیستم‌های گرمایشی اشاره نمود. این بارها که معمولاً به چندین مگاوات توان عملیاتی



شکل ۹: مدار مبدل DC/DC با باتری ذخیره‌سازی انرژی.

سیستم را بهبود بخشید. مدل کنترل پیش‌بین<sup>۱</sup> یک رویکرد مبتنی بر مدل پیشرفته است که از مدل غیرخطی سیستم برای پیش‌بینی وضعیت‌های خروجی آینده استفاده می‌کند و یک دنباله کنترل بهینه را در نتایج خروجی سیستم ایجاد می‌کند [۲۷]. در عمل، با در نظر گرفتن سایر الزامات عملکردی و محدودیت‌های کنترلی مانند به حداقل رساندن هزینه‌ی کنترل و محدودیت‌های دریافت و ارسال سیگنال‌های کنترلی، این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار است.

## ۴- آنالیز پایداری

از روش دوم لیاپانف که به روش مستقیم لیاپانف نیز مشهور است برای بررسی پایداری سیستم غیرخطی ریزشبه‌ی AC/DC بهره گرفته شده است. برای یافتن تابع لیاپانوف سیستم غیرخطی مورد نظر، حاصل ضرب اسکالر روابط (۳)، (۴)، (۱۴)، (۱۵)، (۱۸) و (۱۹) را با متغیرهای حالت مربوطه‌شان و بدون روابط مدل فیلتر و سیستم ذخیره‌سازی انرژی در نظر می‌گیریم.

$$\frac{dV}{dt} = -(R_a + R_L)i_d^2 - R_F i_F^2 - R_D i_D^2 - (R_a + R_L)i_q^2 - R_Q i_Q^2 - 3D\omega^2 + 3T_m\omega - \frac{V_{b,d}^2}{R_b} - \frac{V_{b,q}^2}{R_b} \quad (21)$$

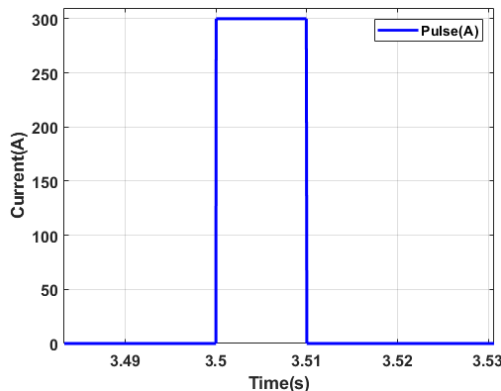
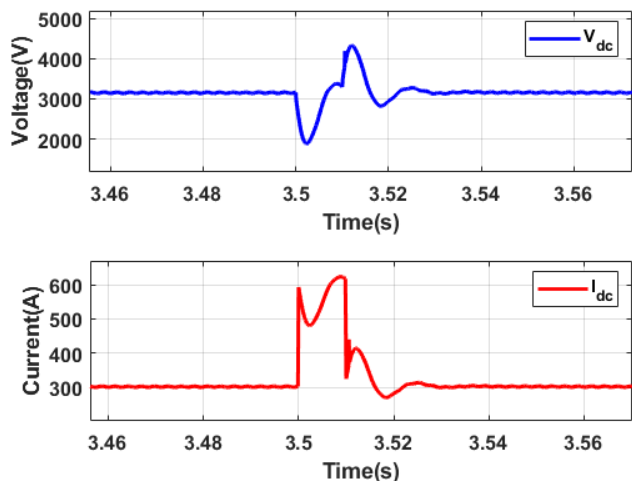
با توجه به (۲۱)، تابع  $V(X)$  به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$V(X) = \frac{1}{2\omega_B} \{ \langle Li, i \rangle + \langle C_F V_c, V_c \rangle + \epsilon \omega_B \langle H \omega, \omega \rangle + \langle C_b V_{bus,d}, V_{bus,d} \rangle + \langle C_b V_{bus,q}, V_{bus,q} \rangle + \langle L_F i_s, i_s \rangle + \langle C_F V_c, V_c \rangle \} \quad (22)$$

در (۲۲)،  $X$  بردار حالت سیستم غیرخطی است.

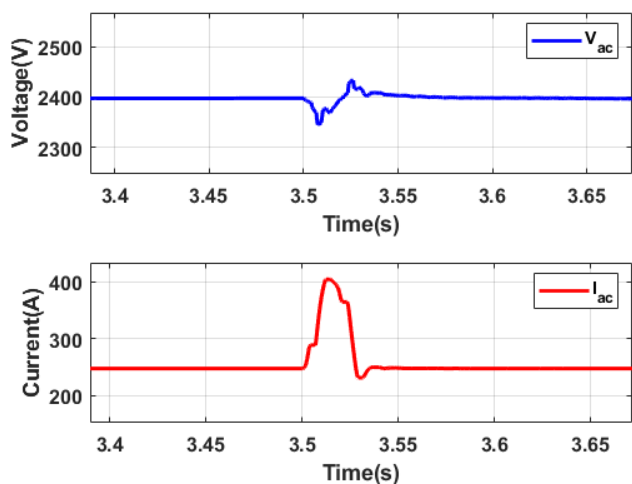
واضح است که  $V$  انرژی ذخیره شده در سلف‌ها، خازن‌ها و اینرسی سیستم را توصیف می‌کند. از (۲۲)، روشن است که  $V(0) = 0$  و  $V(x) > 0$  است. در سمت راست (۲۱)،  $T_m$  ورودی اعمالی از بیرون سیستم است که با استفاده از فیدبک قابل کنترل می‌باشد. فرض می‌کنیم که گشتاور  $T_m$  با استفاده از فیدبک سرعت  $T_m = -K_m \omega$  کنترل می‌شود، سپس در  $\omega = 1$  و برای سایر متغیرهای حالتی که در روابط ریزشبه وجود دارند  $\dot{V} \leq 0$  است. بنابراین طبق روش دوم لیاپانف، سیستم در  $\omega = 1$  پایدار است [۳].

به طور کلی شناورهای نظامی به انواع بارهای خاص از قبیل رادارها، سلاح‌های لیزری، پرتابگرهای پهپاد و سلاح‌های الکترومغناطیسی مجهز هستند. این بارها به توان پرودیک بسیار بالا از صدها کیلووات تا ده‌ها گیگاوات با دوره‌ی زمان بسیار کم از چند میکروثانیه تا چند ثانیه نیاز

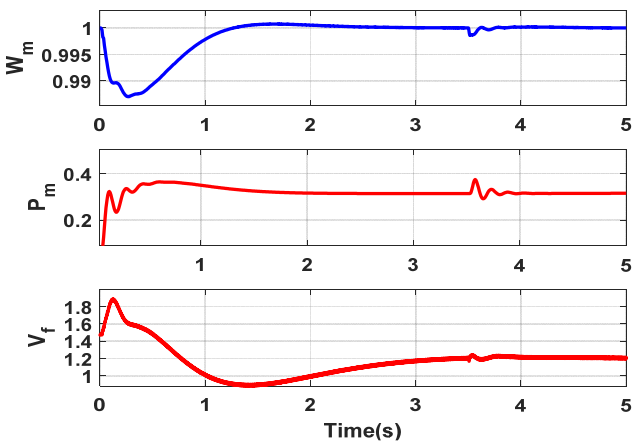


شکل ۱۱: بار پالسی با دامنه‌ی جریان ۳۰۰ آمپر و طول دوره‌ی ۰.۰۱ s.

شکل ۱۲: تغییرات ولتاژ و جریان خروجی زیرسیستم DC با اعمال بار پالسی بر روی شینه‌ی DC.



شکل ۱۳: تغییرات ولتاژ و جریان خروجی زیرسیستم AC با اعمال بار پالسی شینه‌ی DC.



شکل ۱۴: پارامترهای عملکردی ژنراتور سنکرون با اعمال بار پالسی شینه‌ی DC.

توجه به شکل ۱۵، واضح است که با اعمال بار پالسی، جریان خط به شدت افزایش می‌یابد و منجر به افت ولتاژ مؤثر شینه‌ی AC مربوطه می‌گردد. سیم‌پیچ‌های دمپر و سیستم تحریک ژنراتور سنکرون کمک می‌کنند تا حالت‌های گذرای سیستم به حداقل برسد و سیستم پس از گذشت ۱۰ ms با زاویه‌ی آتش مبدل تریستوری در  $\alpha = 0^\circ$  به حالت اولیه‌ی خود باز گردد.

نیاز دارند، مستقیماً از شینه توزیع DC از طریق مبدل‌های DC/DC تأمین می‌شوند. با توجه به ادغام بارهای پالسی و بارهای توان بالا، کنترل هماهنگی حفاظتی و پایداری ریزشکبه‌ی AC/DC دو موضوع مهم و حیاتی هستند. علاوه بر این، افت ولتاژ ناشی از بارهای پالسی باید در شینه‌ی مشترک جبران گردند تا کیفیت توان و پایداری سیستم تضمین شود [۱].

برای شبیه‌سازی بار پالسی بر روی شینه‌ی زیرسیستم DC، شرایط اولیه سیستم را برای ولتاژ خط به خط ۲/۴۰ kV و با فرکانس ۶۰ هرتز و با زاویه آتش  $\alpha = 0^\circ$  برای مبدل تریستوری در نظر می‌گیریم، سپس یک بار پالسی جریانی مطابق شکل ۱۱ در لحظه‌ی  $t = 3/5$  S برای مدت زمان ۱۰ میلی ثانیه و با دامنه‌ی جریان ۳۰۰ آمپر اعمال می‌شود. حداکثر ولتاژ خروجی مبدل شش پالسه‌ی تریستوری به زاویه‌ی آتش تریستورها بستگی دارد. از آنجایی که ولتاژ خروجی مبدل تریستوری در زاویه‌ی آتش  $\alpha = 0^\circ$  دارای بیشترین مقدار خود است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین حالت گذرا و اغتشاشات ناشی از بارهای پالسی در این زاویه روی می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۲، ولتاژ خروجی زیرسیستم DC در اثر اعمال بار پالسی بطور محسوسی کاهش و جریان خط DC بصورت چشمگیری افزایش می‌یابد.

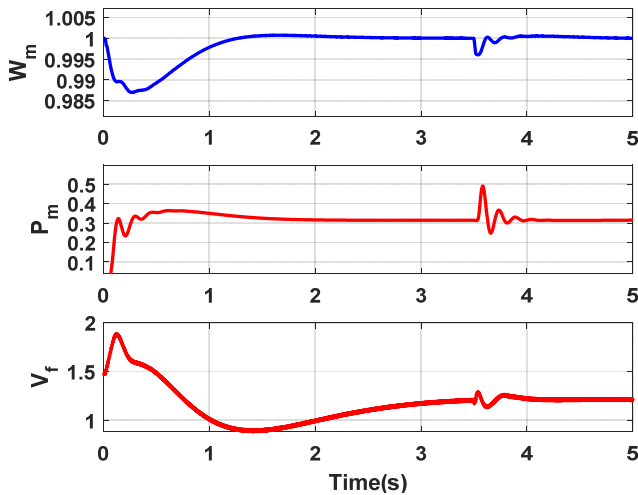
مطابق شکل ۱۳ هنگام اعمال بار پالسی بر روی شینه‌ی DC، ولتاژ مؤثر خط به خط زیرسیستم AC در ابتدا کاهش و پس از گذشت حالت‌های گذرا به حالت پایدار اولیه‌ی خود می‌رسد. جریان مؤثر زیرسیستم AC نیز در ابتدا افزایش و سپس بعد از رفع بار پالسی به حالت اولیه‌ی خود باز می‌گردد و پایدار می‌شود.

شکل ۱۴، پارامترهای عملکردی از قبیل سرعت زاویه‌ای، توان اکتیو و ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون را نشان می‌دهد. هنگامیکه بار پالسی در لحظه‌ی  $t = 3/5$  S برای مدت زمان ۱۰ ms و با دامنه‌ی جریان ۳۰۰ آمپر بر روی شینه‌ی DC اعمال می‌شود دارای نوساناتی می‌باشد که پس از رفع بار پالسی، به سرعت به مقادیر پایدار خود می‌رسند که پایداری به روش دوم لیپانوف که در بخش بحث شد را اثبات می‌کند. توجه داشته باشید که نوسانات ثانیه‌های اول شبیه‌سازی مربوط به راه‌اندازی ژنراتور سنکرون می‌باشد.

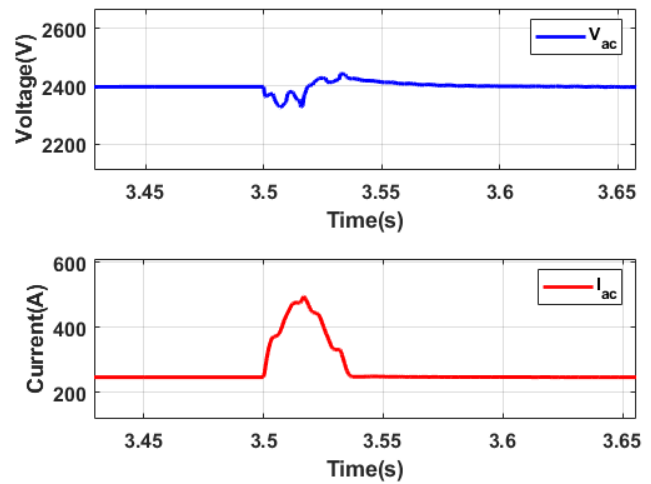
۲-۱-۵ اعمال بار پالسی بر روی شینه‌ی AC

در این شبیه‌سازی با فرض ثابت بودن بار خروجی زیرسیستم DC، در لحظه‌ی  $t = 3/5$  S برای مدت زمان ۱۰ میلی ثانیه یک بار پالسی مقاومتی با توان ۵۰۰ kW به شینه‌ی زیرسیستم AC اعمال می‌شود. با

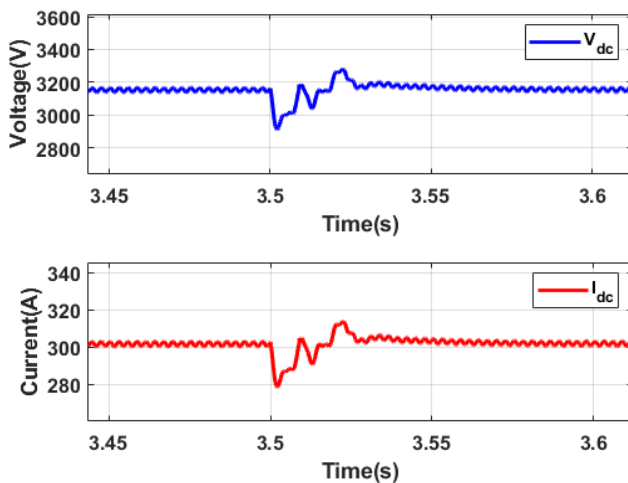




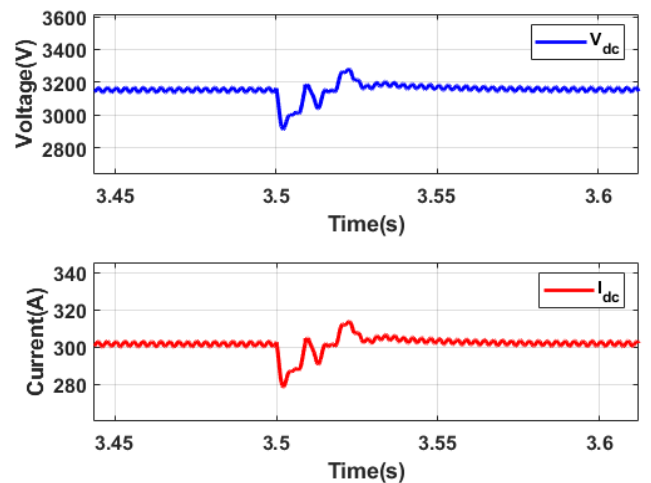
شکل ۱۷: پارامترهای خروجی ژنراتور سنکرون با بار پالسی بر روی زیرسیستم AC.



شکل ۱۵: ولتاژ و جریان خط AC با اعمال بار پالسی شینه AC.



شکل ۱۸: مقایسه‌ی ولتاژ خروجی زیرسیستم DC با حضور و عدم حضور کنترل‌کننده‌ی DC.



شکل ۱۶: ولتاژ و جریان زیرسیستم DC با اعمال بار پالسی روی شینه‌ی AC.

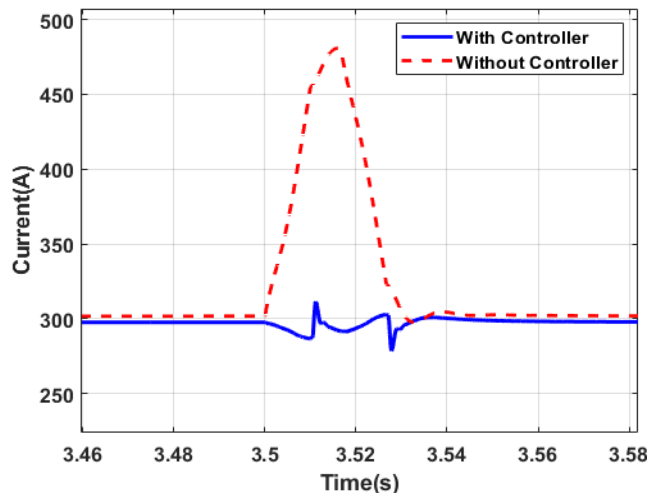
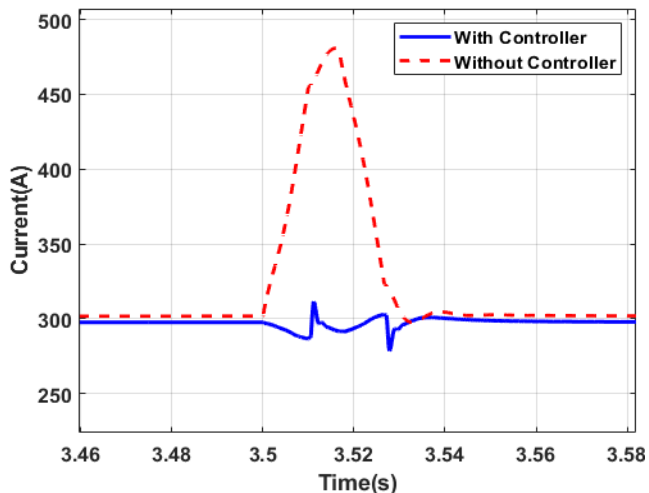
## ۲-۵ شبیه‌سازی اعمال بارهای پالسی روی شینه‌های AC و DC با وجود کنترل‌کننده‌ی زیرسیستم DC

### ۲-۵-۱ اعمال بار پالسی روی شینه‌ی DC

در این بخش بار پالسی بر روی شینه‌ی DC با سوئیچینگ میدل DC/DC برای کاهش حالت‌های گذرای زیرسیستم DC مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط اولیه شبیه‌سازی برای ولتاژ خط به خط شینه‌ی AC در  $2/40 \text{ kV}$ ، فرکانس  $60 \text{ Hz}$  و زاویه‌ی آتش میدل در  $\alpha = 0^\circ$  تعیین شده است. یک بار پالسی در لحظه‌ی  $t = 3/5 \text{ S}$  مطابق شکل ۱۱ و برای مدت زمان ۱۰ میلی ثانیه به زیرسیستم DC اعمال می‌شود. با توجه به شکل ۱۸، حالت‌های گذرای ولتاژ خروجی زیرسیستم DC در حضور کنترل‌کننده‌ی سیستم ذخیره‌سازی انرژی بسیار کاهش یافته و توانسته است مشخصه‌ی شکل موج ولتاژ خود را بهبود دهد. توجه به این نکته ضروری است که با کاهش حالت‌های گذرای زیرسیستم DC و با سوئیچینگ نرم میدل DC/DC، نوسانات و ناپایداری گذرای پارامترهای خروجی ژنراتور سنکرون از قبیل سرعت زاویه‌ای، توان اکتیو و ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون تعدیل می‌یابد. لازم به ذکر است که برای نمایش و مقایسه‌ی بهتر شکل موج‌ها، مقادیر متوسط آنها جهت ترسیم در نظر گرفته شده است.

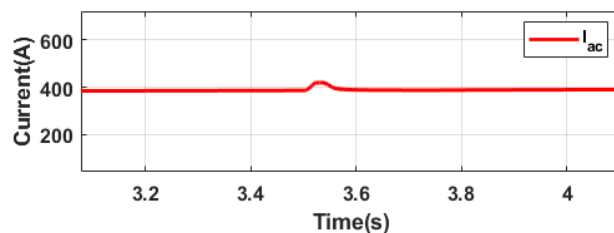
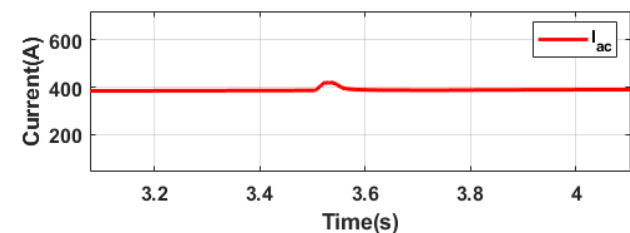
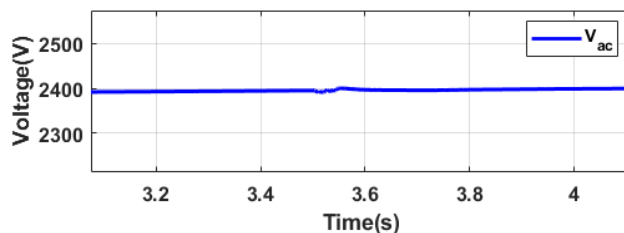
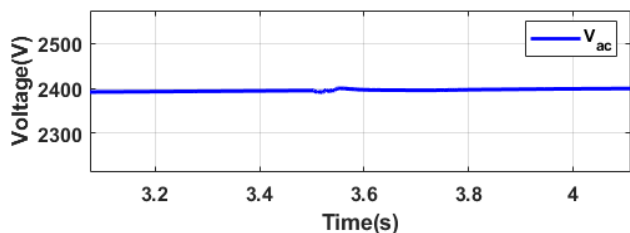
اغتشاشات بار پالسی AC و ارتباط دینامیکی بین زیرسیستم‌های AC و DC باعث ایجاد حالت‌های گذرای در زیرسیستم DC می‌شود. با توجه به شکل ۱۵، با اعمال بار پالسی بر روی شینه‌ی زیرسیستم AC، جریان خطی زیرسیستم AC افزایش و ولتاژ شینه‌ی آن کاهش می‌یابد. بنابراین مطابق شکل ۱۶، با افت ولتاژ زیرسیستم AC، ولتاژ و جریان خط زیرسیستم DC به واسطه‌ی میدل شش پالسه‌ی تریستوری کاهش می‌یابند. حالت‌های گذرا در زیرسیستم DC با وجود کنترل‌کننده‌های محرک اصلی و کنترل تحرک ژنراتور سنکرون بهبودی نداشته و این اغتشاشات باعث افت ولتاژ و کاهش جریان خط DC در زمان مربوطه شده است.

شکل ۱۷، پارامترهای خروجی ژنراتور سنکرون را هنگام اعمال بار پالسی بر روی شینه‌ی AC نشان می‌دهد. در لحظه‌ی  $t = 3/5 \text{ s}$  و با گذشت  $10 \text{ ms}$ ، ژنراتور سنکرون متحمل نوساناتی در پارامترهای عملکردی و خروجی خود می‌شود که این نوسانات منجر به تغییرات پارامترهای ریزشبکه‌ی AC/DC می‌گردد. پس از گذشت اغتشاشات ناشی از بار پالسی بر روی شینه‌ی AC، پارامترهای خروجی ژنراتور سنکرون از قبیل، سرعت زاویه‌ای، توان اکتیو و ولتاژ تحریک پس از نوساناتی پایدار می‌شوند که این خود، پایداری به روش دوم لیاپانف را اثبات می‌نماید.



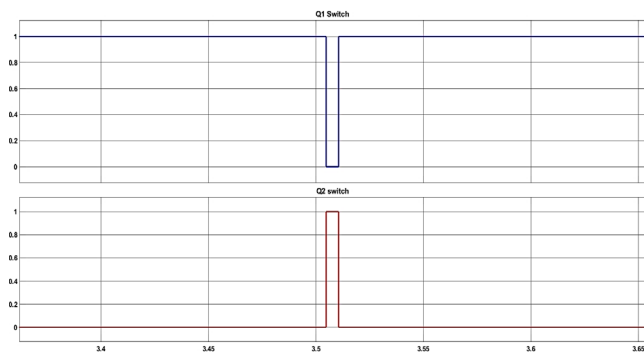
شکل ۲۱: مقایسه‌ی ولتاژ زیرسیستم AC با حضور و عدم حضور کنترل‌کننده‌ی DC.

شکل ۱۹: مقایسه‌ی جریان بار زیرسیستم DC با حضور و عدم حضور کنترل‌کننده‌ی DC.



شکل ۲۲: پارامترهای خروجی ژنراتور سنکرون با بار پالسی در شینه‌ی DC.

شکل ۲۰: حالت‌های گذرای جریان خط و ولتاژ شینه‌ی AC با اعمال بار پالسی DC.



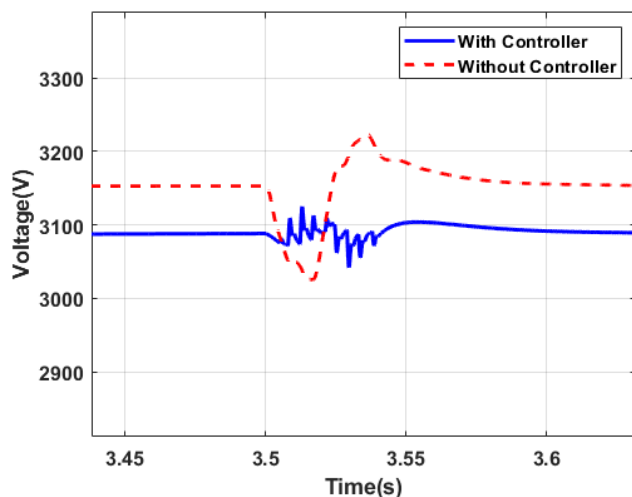
شکل ۲۳: حوی سوئیچینگ  $Q_1$  و  $Q_2$  مبدل DC/DC با اعمال بار پالسی شینه‌ی DC.

### ۲-۲-۵ اعمال بار پالسی بر روی شینه‌ی AC

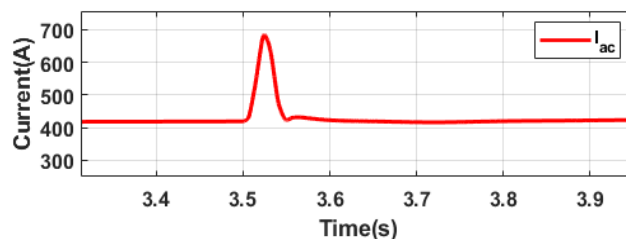
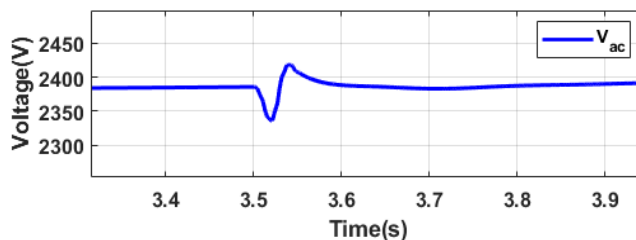
در این بخش به راحتی می‌توان تأثیر کنترل‌کننده‌ی زیرسیستم DC را برای یک بار پالسی مطابق شکل ۱۱ در لحظه‌ی  $t = 3/5$  S و برای مدت زمان ۱۰ ms بر روی شینه‌ی AC درک کرد. با توجه به شکل ۲۴، مشاهده می‌شود که هیچ بهبودی در جریان خط و ولتاژ شینه‌ی زیرسیستم AC حاصل نشده است. مقایسه‌ای برای ولتاژ شینه‌ی زیرسیستم AC در شکل ۲۵ آورده شده است و نشان می‌دهد که در حضور کنترل‌کننده‌ی زیرسیستم DC و در برابر اعمال بار پالسی بر روی شینه‌ی AC، مشخصه‌ی شکل موج ولتاژ بهبود معناداری پیدا نکرده است.

مطابق شکل ۱۹، حالت‌های گذرای جریان بار زیرسیستم DC، در حضور کنترل‌کننده‌ی زیرسیستم DC تعدیل چشمگیری داشته است. همان‌طور که در شکل ۲۰، مشاهده می‌شود، حالت‌های گذرای جریان خط و ولتاژ شینه‌ی AC هنگام اعمال بار پالسی DC و سوئیچینگ مبدل DC/DC و دشارژ باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی بشدت کاهش داشته است و حالت‌های گذرای بسیار اندکی در لحظه‌ی  $t = 3/5$  S و برای مدت زمان ۱۰ ms در زیرسیستم AC مشاهده می‌شود. حالت‌های گذرای ولتاژ خط AC که در شکل ۲۱ نشان داده شده است نسبت به حالتی که در زیرسیستم DC هیچ کنترل‌کننده‌ای نداریم کاهش مطلوبی داشته است. مطابق شکل ۲۲، با اعمال بار پالسی بر روی شینه‌ی DC و با سوئیچینگ مبدل DC/DC، مشخصات خروجی ژنراتور سنکرون دارای نوسانات ناچیزی در  $t = 3/5$  S و برای مدت زمان ۱۰ ms در برابر بار پالسی از خود نشان داده است.

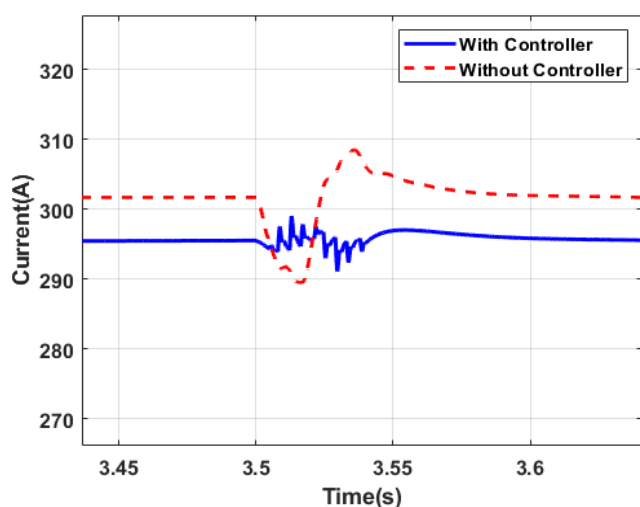
با توجه به مدار مبدل DC/DC و باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی آن مطابق شکل ۸، نحوه‌ی سوئیچینگ کلیدهای  $Q_1$  و  $Q_2$  مبدل DC/DC با اعمال بار پالسی بر روی زیرسیستم DC به صورت شکل ۲۳ می‌باشد. با اعمال بار پالسی و ایجاد اغتشاش در ریزشکبه‌ی شناور، سوئیچ  $Q_1$  قطع و سوئیچ  $Q_2$  وصل و مبدل DC/DC در حالت بوست، باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی را بر روی زیرسیستم DC دشارژ می‌کند و باعث کاهش حالت‌های گذرا در ریزشکبه‌ی AC/DC می‌گردد.



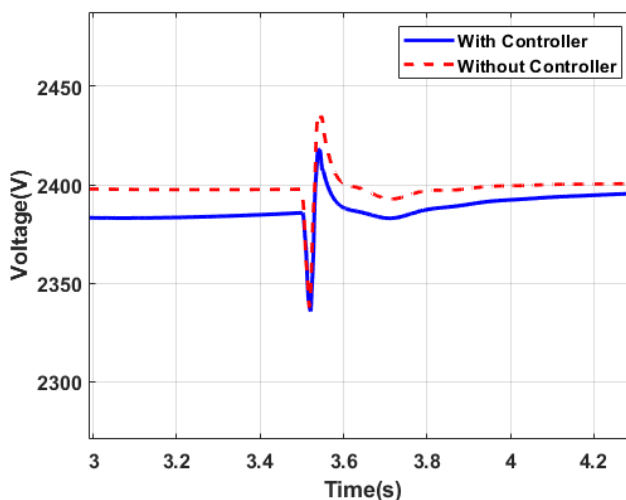
شکل ۲۶: مقایسه‌ی ولتاژ خروجی زیرسیستم DC با حضور و عدم حضور کنترل‌کننده‌ی زیرسیستم DC.



شکل ۲۴: ولتاژ و جریان خطی AC با بار پالسی بر روی شینه AC.



شکل ۲۷: مقایسه‌ی جریان بار زیرسیستم DC با حضور و عدم حضور کنترل‌کننده‌ی زیرسیستم DC.



شکل ۲۵: مقایسه‌ی ولتاژ زیرسیستم AC با حضور و عدم حضور کنترل‌کننده‌ی DC.

حالت‌های گذرای ریزشکه کافی نیستند و باید برای کنترل ناپایداری در هر دو زیرسیستم AC و DC روش‌های کنترلی مناسبی پیاده‌سازی شود. بنابراین در این مقاله جهت تعدیل حالت‌های گذرای زیرسیستم DC از کنترل‌کننده‌ی سیستم ذخیره‌سازی انرژی با سیستم کنترلی حلقه بسته‌ی PI جهت کنترل ضریب وظیفه‌ی سوئیچ‌های IGBT مبدل DC/DC استفاده شده است و با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌توان مشاهده کرد که حالت‌های گذرای پارامترهای زیرسیستم DC از قبیل ولتاژ و جریان کاهش چشمگیری داشته‌اند و وجود سیستم ذخیره‌سازی انرژی با کنترل‌کننده‌ی مناسب باعث بهبود پایداری ریزشکه AC/DC شده است. همچنین برای کنترل ناپایداری بر روی زیرسیستم AC از سیستم تحریک ژنراتور و محرک اصلی بهره گرفته شده است.

## پیوست

چهار جدول پیوست پ-۱ الی پ-۴ به ترتیب مشخصات پارامترهای اجزای زیرسیستم AC به استثنای ژنراتور سنکرون، ژنراتور سنکرون، اجزای زیرسیستم DC، و مبدل DC/DC با باتری ذخیره‌ساز و کنترل‌کننده‌ی PI مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های این تحقیق را نشان می‌دهند.

## ۶- نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که زیرسیستم‌های AC و DC بر اثر هرگونه ناپایداری ناشی از بارهای پالسی توان بالا بصورت دینامیکی بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند و هرگونه حالت گذرای بر روی یک زیرسیستم باعث حالت‌های گذرای بر روی زیرسیستم دیگر می‌شود. علاوه بر این، سیم‌پیچی‌های دمپر ژنراتور سنکرون برای کاهش

پ-۱: پارامترهای اجزای زیرسیستم AC به استثنای ژنراتور سنکرون.

| واحد          | مقدار | نماد  | نام                 |
|---------------|-------|-------|---------------------|
| $\Omega$      | ۰/۰۰۸ | $R_L$ | مقاومت خط انتقال    |
| $\mu\text{H}$ | ۷۰    | $L_L$ | اندوکتانس خط انتقال |
| $\Omega$      | ۳/۴۸  | $R_b$ | مقاومت شینه AC      |
| nF            | ۲/۸۵  | $C_b$ | خازن شینه AC        |

پ-۳: پارامترهای اجزای زیر سیستم DC.

| واحد       | مقدار  | نماد     | نام              |
|------------|--------|----------|------------------|
| m $\Omega$ | ۰/۳۴۸  | $R_{FI}$ | مقاومت فیلتر     |
| mH         | ۱۰/۶   | $L_{FI}$ | اندوکتانس فیلتر  |
| mF         | ۰/۲۸۶  | $C_F$    | خازن ذخیره‌ساز   |
| $\Omega$   | ۰/۳۴۸۴ | $R_c$    | مقاومت ذخیره‌ساز |

پ-۲: پارامترهای ژنراتور سنکرون.

| واحد | مقدار | نماد       | نام   |
|------|-------|------------|---|
| kVA  | ۳۱۲۵  | $S$        | توان نامی                                   |
| kV   | ۲/۴۰  | $V$        | ولتاژ خط به خط نامی                         |
| Hz   | ۶۰    | $f$        | فرکانس نامی                                 |
| pu   | ۲/۴۴  | $x_d$      | راکتانس سنکرون محور $d$                     |
| pu   | ۰/۲۱۱ | $x'_d$     | راکتانس گذرای محور $d$                      |
| pu   | ۰/۱۶۵ | $x''_d$    | راکتانس زیرگذرای محور $d$                   |
| pu   | ۱/۲۲  | $x_q$      | راکتانس سنکرون محور $q$                     |
| pu   | ۱/۲۲  | $x'_q$     | راکتانس گذرای محور $q$                      |
| pu   | ۰/۱۶۵ | $x''_q$    | راکتانس زیرگذرای محور $q$                   |
| pu   | ۰/۱۷۴ | $x_\gamma$ | راکتانس توالی منفی                          |
| pu   | ۰/۰۵  | $x_0$      | راکتانس توالی صفر                           |
| pu   | ۰/۱۷۴ | $x_l$      | راکتانس نشستی آرمیچر                        |
| s    | ۳/۶   | $\tau'_d$  | ثابت زمان مدار باز میدان*                   |
| s    | ۰/۳۱  | $\tau''_d$ | ثابت زمانی زیرگذرای سیم‌پیچ دمپر محور $d$ # |
| s    | ۰/۰۴  | $\tau''_q$ | ثابت زمانی زیرگذرای سیم‌پیچ دمپر محور $q$ § |

\* Open Field Circuit Time Constant

# Subtransient of Amortisseur ( $d$ -axis) Ttime Constant

§ Subtransient of Amortisseur ( $q$ -axis) Time Constant

پ-۴: پارامترهای مبدل DC/DC با باتری ذخیره‌ساز و کنترل کننده‌ی PI.

| واحد      | مقدار | نماد     | نام                       |
|-----------|-------|----------|---------------------------|
| V         | ۲۵۰۰  | $V_I$    | ولتاژ باتری‌ها            |
| $\Omega$  | ۰/۰۱  | $R_I$    | مقاومت داخلی باتری        |
| $\Omega$  | ۰/۰۰۱ | $R_{on}$ | مقاومت وصل IGBT           |
| $\Omega$  | ۰/۰۰۱ | $R_{LP}$ | مقاومت فیلتر سری          |
| mH        | ۰/۲۴۳ | $L_c$    | اندوکتانس فیلتر سری       |
| s         | ۰/۰۰۵ | $\tau_c$ | ثابت زمانی کنترل کننده PI |
| بدون واحد | ۱     | $k_{cp}$ | ضریب خطا                  |
| بدون واحد | ۰/۱   | $k_{ci}$ | ضریب انتگرال گیر          |

21st Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, pp. 701-705, Chengdu, China, 15-18 Oct., 2024.

[10] M. Valdes and H. Floyd, "Considerations for adapting IEEE 1584-2002 arc flash study results to a post IEEE 1584-2018 risk assessment," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 6, pp. 5562-5570, Aug. 2021.

[11] D. R. Doan, "Arc flash Calculations for Exposures to DC systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 6, pp. 2299-2302, Dec. 2010.

[12] L. Xu, et al., "A review of DC shipboard microgrids - part II: control architectures, stability analysis, and protection schemes," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 37, no. 4, pp. 4195-4120, Oct. 2022.

[13] S. Kim, *Protection Coordination in Marine DC Power Distribution Networks*, Ph.D. Thesis, EPFL, Switzerland, 2020.

[14] H. Liu, H. Guo, J. Liang, and L. Qi, "Impedance-based stability analysis of MVDC systems using generator-thyristor units and DTC motor drives," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 5-13, Mar. 2016.

[15] -, *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, Baltimore, MD, USA, 14-16 Sept. 2009.

[16] N. Eghtedarpour and E. Farjah, "Power control and management in a Hybrid AC/DC microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1494-1505, May 2014.

[17] K. Chajjarunrudomrung, K. N. Areerak, and K. L. Areerak, "Modeling and stability analysis of AC-DC power system with controlled rectifier and constant power loads," *WSEAS Trans. on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 31-41, Apr. 2011.

[18] J. Shi, R. Amgai, and S. Abdelwahed, "Modelling of shipboard medium-voltage direct current system for system level dynamic analysis," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 5, no. 4, pp. 156-165, Dec. 2015.

[19] Il-yop Chung, Wenxin Liu, David A Cartes, Soo-hwan Cho, and Hyun-koo Kang, "Controller optimization for bidirectional power flow in medium-voltage DC power systems," *Journal of Electrical Engineener & Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 750-759, 2011.

[20] -, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Alexandria, VA, USA, 10-13 Apr. 2012.

[21] P. S. Sarker and S. Biswas, "Modeling and non-linear stability analysis of ac/dc interconnected microgrid using dq-transformation considering generator dynamics," in *Proc. 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 4039-4044, Washington, DC, USA, 21-23 Oct. 2018.

[22] P. M. Anderson and C. A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Second Edition, John Wiley & Sons, 2008.

[23] K. N. Areerak, S. V. Bozhko, G. M. Asher, and D. W. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load using DQ-transformation method," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics*, 6. pp., Cambridge, UK, 30 Jun.- 2 Jul. 2008.

## مراجع

[1] L. Xu et al., "A review of DC shipboard microgrids - part I: power architectures, Energy Storage, and Power Converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 37, no. 5, pp. 5155-5172, May 2022.

[2] N. Doerry, "Next generation integrated power systems (NGIPS) for the future fleet," in *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symp.*, Baltimore, MD, USA, 14-16 Sept. 2009.

[3] P. S. Sarker, *Dynamic Modeling, Stability Analysis and Control of AC/DC Interconnected Microgrid Using DQ-Transformation*, Ph.D. Thesis, Temple Iniversity, USA, 2018.

[4] -, *IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships*, *IEEE Std. 1709-2010*, pp. 1-54, Nov. 2010.

[5] -, *IEEE Guide for the Design and Application of Power Electronics in Electrical Power Systems on Ships*, *IEEE Std. 1662-2008*, pp. 1-72, 2009.

[6] -, *IEEE Standard for Power Electronics Open System Interfaces in Zonal Electrical Distribution Systems Rated Above 100 kW*, *IEEE Std. 1826-2012*, pp. 1-46, 2012.

[7] N. Doerry and J. Amy, "DC voltage interface standards for naval applications," in *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symp.*, 2015, pp. 318-325, Old Town Alexandria, VA, USA, 21-24 Jun. 2015.

[8] -, *IEC/IEEE International Standard - Utility Connections in Port - Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems - General Requirements*, *IEC/IEEE 80005-1:2019*, pp. 1-178, 2019.

[9] H. Zhang, Q. Wang, H. Chen, Y. Xu, and Y. Wang, "Comparative analysis of IEC 61000-4-30 evolution in power quality," in *Proc.*

**مهدی مصیبی** در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه کاشان و در سال ۱۳۹۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه کاشان و مدرک دکتری خود را در سال ۱۳۹۹ از دانشگاه شاهد دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۹۲ در مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران مشغول به فعالیت بوده و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشگاه با مرتبه استادیار می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، ریزشبکه‌های هوشمند، انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت توان شبکه‌های الکتریکی.

**محمد رضا عزیزاده پهلوانی** در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز و در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۷۷ الی ۱۳۸۸ نام‌برده به عنوان محقق سیستم‌های قدرت در مرکز تحقیقات کنترل دانشگاه صنعتی مالک اشتر مشغول به کار بود. در سال ۱۳۸۲ به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه علم و صنعت ایران وارد گردید و در سال ۱۳۸۸ موفق به اخذ درجه دکتری مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. ایشان از سال ۱۳۸۸ در مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشگاه با مرتبه استادی می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت، سیستم پالسی، شبکه‌های الکتریکی و کنترل می‌باشد.

- [24] M. Djibo, Protection and Disturbance Mitigation of Next Generation Shipboard Power Systems. Ph.D. Thesis, Old Dominion University, USA, 2021.
- [25] Y. Lu, Optimal Scheduling and Loadsharing of a Hybrid Power Plant with Gensets and Battery Banks, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2019.
- [26] J. Zhang, Bidirectional DC-DC Power Converter Design Optimization, Modeling and Control, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, USA, 2008.
- [27] N. Zohrabi, *Distributed Predictive Control for MVDC Shipboard Power System Management*, Ph.D. Thesis, Mississippi State University, USA, 2018.

**مصطفی زمانی** در سال ۱۳۹۳ مدرک کارشناسی مهندسی برق- شبکه‌های انتقال و توزیع خود را از دانشگاه غیرانتفاعی صدرالمطهرین (صدرا) دریافت نمود و پس از چند سال کار تخصصی در صنعت قطارهای برقی (مترو تهران)، در سال ۱۴۰۰ در دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق با گرایش الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران پذیرفته شد و در سال ۱۴۰۳ فارغ التحصیل گردید. زمینه‌های علمی و تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی سیستم‌های زمین متمرکز پلنت‌های صنعتی و ساختمانی، ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت، سیستم‌های انتقال جریان مستقیم (HVDC).

**آرش دهستانی کلاگر** در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران و در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه اصفهان و مدرک دکتری خود را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود. نام‌برده از سال ۱۳۹۳ به‌عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران مشغول به فعالیت گردید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، مبدل‌های توان بالا، فیلترهای اکتیو، کوره‌های قوس الکتریکی و سیستم‌های مغناطیسی.