

# مدیریت توان الکتریکی در شبکه الکتریکی شناورها با استفاده از روش کنترل پیش بین توزیع شده

سعید نوابی، مهدی مصیبی، محمدرضا علیزاده پهلوانی و آرش دهستانی کلاگر

است. سیستم قدرت مبتنی بر ولتاژ DC در شناورها طیف وسیعی از مزایا و پیشرفت‌ها را به همراه دارد. به‌عنوان مثال، نیازی به همگام‌سازی زاویه فاز منابع و بارها نیست، بنابراین اتصال انواع مختلف ژنراتورها، ذخیره سازی و بارها را می‌توان تسهیل کرد. علاوه بر این، محدودیت‌های فرکانس از طراحی ژنراتورها حذف می‌شود، بنابراین اندازه و وزن آنها کاهش می‌یابد. مصرف سوخت نیز به دلیل عملکرد موتورهای سرعت متغیر کاهش می‌یابد.

از طریق تکامل فناوری‌های ارتباطی کامپیوتری و شبکه‌ای، رویکرد کنترل توزیع شده مزایای مهمی را نسبت به معماری متمرکز ارائه می‌دهد که آن را قادر می‌سازد تا برای مسائل مختلف دنیای واقعی کاربرد بیشتری داشته باشد. در ساختار کنترل توزیع شده، مسئله متمرکز به چندین واحد کنترل محلی تجزیه می‌شود که مشکلات بهینه‌سازی خود را در پردازنده های جداگانه محاسبه می‌کنند و برای رسیدن به یک هدف سیستم حلقه بسته به طور مؤثر ارتباط برقرار می‌کنند.

مزیت کنترل توزیع شده رفتار خوب، تحمل خطا و استحکام آن است. این بدان معناست که اگر یک رویداد غیرمنتظره در یک زیرسیستم اتفاق بیفتد، برخلاف کنترل متمرکز، کنترل‌کننده‌های محلی دیگر همچنان می‌توانند کار کنند و کل سیستم تحت تأثیر خرابی احتمالی قرار نمی‌گیرد. انعطاف‌پذیری بالا یکی دیگر از مزایای مهم یک چارچوب توزیع شده است. این ساختار هرگونه توسعه و نگهداری احتمالی سیستم کنترل را ساده می‌کند. اگر یک زیرسیستم جدید به سیستم فعلی اضافه شود، فقط لازم است زیرسیستم‌هایی که با زیرسیستم جدید تعامل دارند اصلاح شوند، بنابراین به‌راحتی مقیاس‌پذیر است. علاوه بر این، به دلیل نیازهای محاسباتی پایین‌تر، اجرای طرح توزیع شده آسان‌تر است. سربار محاسباتی کمتری دارد؛ زیرا یک مسئله دشوار با چندین مشکل در مقیاس کوچک‌تر جایگزین می‌شود. باید توجه کرد که عملکرد این ساختار به شدت به میزان تعامل بین زیرسیستم‌ها و الگوریتم هماهنگی عامل‌ها بستگی دارد [۱] و [۲]. مزایای ذکر شده در بالا استفاده از کنترل توزیع شده را در بسیاری از برنامه‌ها توجیه می‌کند. هدف از این مقاله ارائه یک ساختار کنترل توزیع شده برای یک سیستم قدرت غیرخطی شناور است که با استفاده از منابع ژنراتوری و باتری و ابرخازن در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است تا در مقابل اعمال بار پالسی بتواند توان مصرفی بارهای مصرفی خود را به طور یکسان تأمین کند و دچار افت ولتاژ در شبکه نشود به همین منظور برای رسیدن به اهداف مذکور مدل شناور در نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی شده است و نتایج آن در ادامه آورده شده است. در ادامه مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. بخش دوم مدل کلی شبکه DC شناور مورد بررسی قرار گرفته است. بخش سوم معادلات ریاضی و فرمول بندی آن با ساختار کنترل توزیع شده برای سیستم قدرت شناور

چکیده: در این مقاله، یک ساختار کنترل توزیع شده برای مدیریت توان در سیستم قدرت شناور<sup>۱</sup> (SPS) با ولتاژ DC غیرخطی ارائه شده است. معماری کنترل توزیع شده دارای مزایای بار محاسباتی کمتر، انعطاف‌پذیری بالا و تحمل خطای خوبی است. در این ساختار، هر زیر سیستم توسط یک کنترل‌کننده پیش-بین مدل با استفاده از متغیرها و پارامترهای حالت محلی و همچنین متغیرهای تعاملی از زیرسیستم‌های دیگر که از طریق یک هماهنگ‌کننده به اشتراک گذاشته می‌شوند، کنترل می‌شود. در سطح هماهنگ‌کننده اصلی، یک مسئله بهینه‌سازی به طور مکرر حل می‌شود تا به کمترین مقدار خطا در ولتاژ خروجی و حالت بهینه دست یافت. اثربخشی ساختار کنترل توزیع شده پیشنهادی برای بخش تولید توان کمکی سیستم قدرت شناور انجام شده است که مربوط به بخش مبدل‌های DC-DC است که به عنوان ماژول ذخیره‌ساز انرژی مورد استفاده قرار گرفته است و صحت عملکرد توسط نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده و همچنین تجزیه و تحلیل عملکرد در مقایسه سایر روش‌های کنترلی مبدل‌ها از قبیل کنترل تناسبی با در نظر گرفتن مشخصات سیستم نیز در قسمت مقایسه نتایج نشان داده شده است.

کلیدواژه: مدیریت توان، سیستم قدرت شناور، کنترل پیش‌بین توزیع شده، ذخیره‌ساز انرژی.

## ۱- مقدمه

سیستم قدرت شناور (SPS) به‌عنوان یک شبکه الکتریکی در مقیاس کوچک مستقل شناخته می‌شود که توان را برای سیستم پیش‌رانه و بارهای سرویس در یک کشتی فراهم می‌کند. پیشرفت فناوری خصوصاً در حوزه الکترونیک قدرت در سال‌های اخیر به تغییر ساختار پیش‌رانه شناورها از ساختار سنتی به سوی تمام برقی شدن کمک شایانی کرده است. به علت وجود بارهای بزرگ و ساختار ویژه شناورها، اغتشاش‌های به وجود آمده به‌واسطه شرایط غیرقابل‌پیش‌بینی تأثیر مستقیم بر پایداری شبکه و خصوصاً پایداری ولتاژ دارد که مدیریت توان در این ساختار را نیازمند

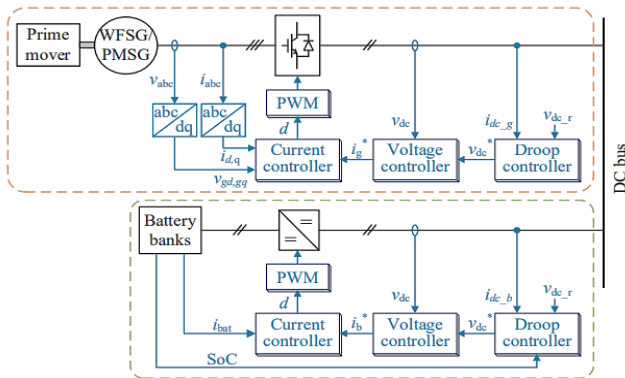
این مقاله در تاریخ ۱۱ مهر ماه ۱۴۰۳ دریافت و در تاریخ ۳ اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ بازنگری شد.

سعید نوابی، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: saeed.zz1956@gmail.com).

مهدی مصیبی (نویسنده مسئول)، 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).

آرش دهستانی کلاگر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، (email: a\_dehestani@mut.ac.ir).



شکل ۱: طرح کنترلی هماهنگ ژنراتور با ذخیره کننده در روش کنترل Droop [۱].

شکل ۱ نشان داده شده است از اجرای ساده بهره می برد. با این حال، اینرسی زیاد در ژنراتورها منجر به پاسخ دینامیکی آهسته در تنظیم ولتاژ از طریق سیستم تحریک می شود و در برآوردن مشخصات بار نوسان شناورها مشکل ایجاد می کند. علاوه بر این، از جنبه مصرف سوخت، دینامیک آهسته تنظیم سرعت روتور را به طور دقیق و لحظه ای برای دستیابی به عملکرد کارآمد دشوار می کند.

### ۱-۲ بار پالسی در ریزشبهک شبکه شناور

بارهای توان پالسی<sup>۶</sup> (PPLs)، مانند رادارها، تفنگ های ریلی الکترومغناطیسی، پرتابگرهای هواپیما و غیره، بارهای ویژه در شناورها، به ویژه در شناورهای نیروی دریایی هستند [۹]. متفاوت از بارهای معمولی شناور، PPL ها دارای مشخصات بار با توان گذرا بسیار بالا به طور متناوب هستند. بنابراین، حتی اگر پیک توان بسیار زیاد باشد، متوسط توان یک PPL نسبتاً کم است، و منبع تغذیه برای جبران این بارها با یک چالش مهم روبرو خواهد شد که باعث مشکلات شدیدی مثل کشیده شدن توان پالسی بالا و لحظه ای از شبکه و افت در کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم می گردد مانند کاهش ولتاژ، نوسانات ولتاژ، عملکرد نادرست حفاظت از سیستم، و حتی خاموشی سیستم می شود [۱۰].

برای برآوردن توان مورد نیاز PPL و کاهش اثرات نامطلوب آن بر سیستم، یک زیرسیستم منبع تغذیه پالسی (PPS) با طراحی کنترلی مناسب مورد نیاز است. یک راه ساده اضافه کردن یک منبع ذخیره ساز انرژی مثل باتری برای تأمین توان گذرا و میرا کردن نوسانات ولتاژ است [۱۱]. از نظر استراتژی کنترل، PPS های موجود بر اساس روش های کنترل خطی مانند کنترل تناسبی (PI) هستند. با این حال، تغییر قابل توجه توان PPL ممکن است منجر به تغییر نقطه عملکرد سیستم در هنگام راه اندازی و پایان دادن به توان پالسی شود. بنابراین، روش های کنترل غیرخطی در کاربرد PPS ترجیح داده می شوند [۱۲].

### ۲- مدل کلی ریزشبهک DC

مدل مورد استفاده در اینجا یک سیستم قدرت غیرخطی شناور DC است که شامل یک ژنراتور اصلی، یک موتور الکتریکی DC است. دو بار محلی، یک بار پالسی ایزوله و یک دستگاه ذخیره انرژی. سیستم توزیع دارای توپولوژی باس حلقوی است. همه ماژول ها توسط ماژول های تبدیل توان مبتنی بر الکترونیک قدرت (PCM) و سوئیچ های قطع DC به باس توزیع DC متصل می شوند. شکل ۲ معماری کلی سیستم DC در نظر گرفته شده را در این کار نشان می دهد.

ارائه شده است. بررسی و تحلیل عملکرد کنترل کننده متمرکز و توزیع شده یک سیستم غیرخطی شناور در بخش چهارم ارائه شده است و در بخش پنجم نتایج شبیه سازی ارائه شده است. همچنین در بخش ششم نتایج کنترلی مقایسه و تحلیل شده است.

### ۱-۱ اهمیت کنترل ولتاژ در ریزشبهک شبکه شناور

مشخصات بارهای پالسی را می توان با ویژگی هایی مثل مقدار اوج، مدت زمان پالس و فرکانس تکرار پالس<sup>۱</sup> (PRF) توصیف کرد که نشان دهنده فاصله متقابل بین دو پالس متوالی است. شکل موج بار توان پالسی باتوجه به انواع مختلف این نوع بارها متفاوت است. به عنوان مثال، مدت زمان پالس و PRF رادارهای دریایی بافاصله ای که هدف در آن قرار دارد تعیین می شود. چنین باری نیازهای خاصی را در سیستم قدرت کشتی ارائه می دهد که به عنوان ریزشبهک کشتی<sup>۲</sup> (SMG) نیز شناخته می شود.

هماهنگی مناسب بین دیزل ژنراتورها و باتری ها برای رفع چالش های موجود در ارائه عملکرد پایدار حیاتی است. برای یک SMG، بدون محدودیت فرکانس سیستم، یکی از مهم ترین اهداف کنترل اطمینان از پایداری ولتاژ است. علاوه بر تنظیم ولتاژ، می توان به اهداف کنترل هماهنگ مختلفی مانند کاهش نوسانات ولتاژ گذرا [۳]، کاهش ظرفیت باتری ها و مبدل ها، در نتیجه به حداقل رساندن هزینه [۴] و تنظیم فرکانس در سیستم AC دست یافت. در ریزشبهک های DC [۵] به طور کلی، دو طرح برای کنترل هماهنگ، دیزل ژنراتورها و باتری ها برای دستیابی به تنظیم ولتاژ و مدیریت توان ارائه می شود. در اولین طرح هماهنگی، همانطور که شکل ۱ نشان داده شده است، ژنراتورهای سنکرون میدان سیم پیچی شده<sup>۳</sup> (WFSGs) منابع توان اولیه هستند که وظیفه تنظیم ولتاژ باس DC را توسط کنترل ولتاژ تحریک دارند و در عین حال، باتری ها عدم تعادل قدرت بین ژنراتورهای سنکرون<sup>۴</sup> (SGs) و بارها را جبران می کنند. ژنراتورها از طریق یکسوکننده های دیودی با قابلیت اطمینان بالا و هزینه کم به باس DC متصل می شوند و کنترل ولتاژ تحریک خروجی را تنظیم می کنند. گاورنر قدرت مکانیکی را با تغییر سرعت زاویه ای موتور  $\omega$  با تنظیم مقدار سوخت تنظیم می کند. تنظیم کننده ولتاژ خودکار<sup>۵</sup> (AVR) ولتاژ خروجی ژنراتور را با کنترل جریان تحریک تنظیم می کند ولتاژ ژنراتور  $V_{abc}$  با دامنه  $V_m$  توسط رابطه محاسبه شده است [۶]

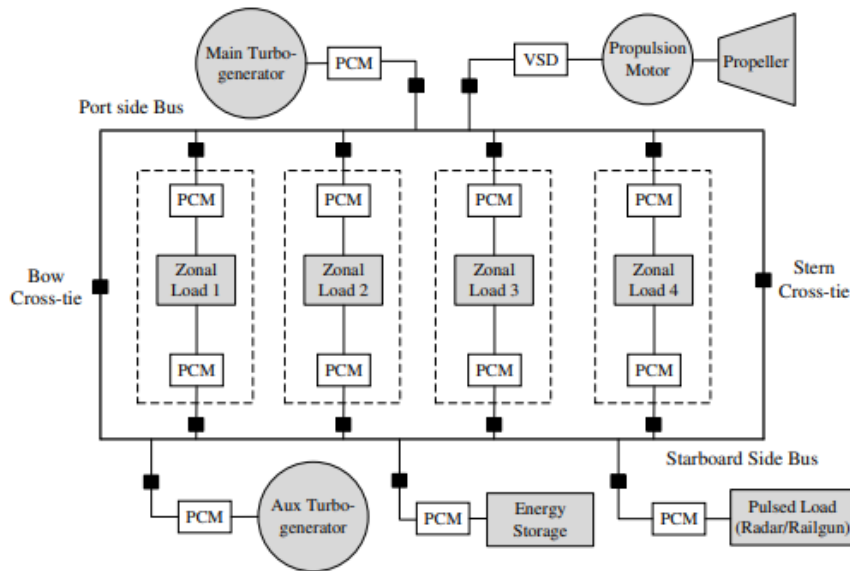
$$V_m = \omega_e L_m i_f \quad (1)$$

که در آن  $\omega_e$  سرعت زاویه ای الکتریکی است،  $L_m$  اندوکتانس مغناطیس شونده ژنراتور، و  $i_f$  جریان تحریک است. با در نظر گرفتن اثر کموتاسیون ژنراتور، ولتاژ خروجی DC یکسوکننده طبق (۲) به دست می آید [۷]

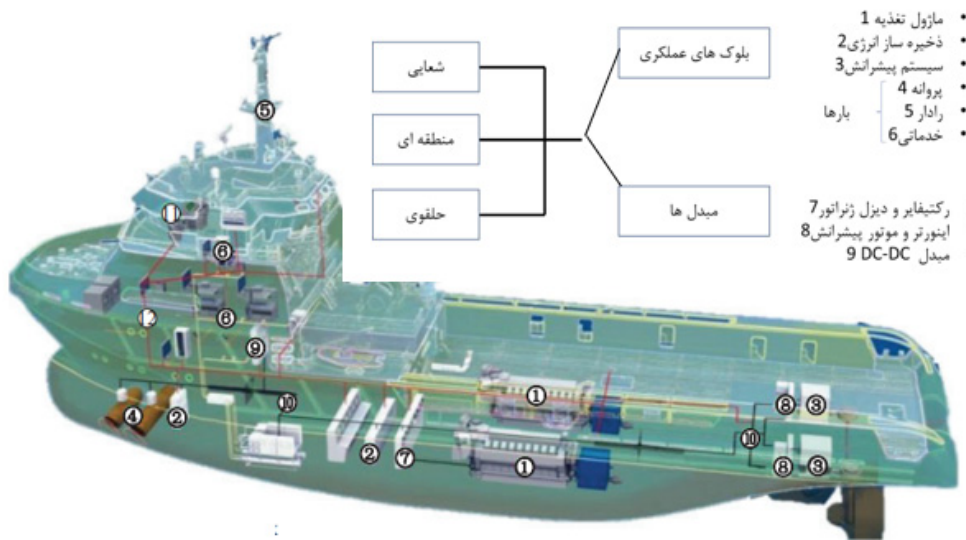
$$v_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m - \frac{3}{\pi} \omega_e L_s i_o \quad (2)$$

که در آن  $L_s$  اندوکتانس ژنراتور سنکرون،  $i_o$  جریان خروجی از یکسو ساز است. طرح کنترل مبتنی بر ولتاژ تحریک ژنراتور که در

1. Pulse Repetition Frequency
2. Shipboard MicroGrid
3. Wound Field Synchronous Generators
4. Synchronous Generators
5. Automatic Voltage Regulator



شکل ۲: ساختار ریز شبکه ولتاژ متوسط شناور [۱۳].



شکل ۳: پیکربندی معمولی DC SMG [۱۴].

همچنین دیاگرام تک‌خطی شبیه‌سازی‌شده شبکه شناور را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد که از دو بخش مجزای تولید توان تشکیل شده است.

نمای کلی یک DC SMG معمولی در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۴]. از آنجایی که اجزای قدرت متعددی در سیستم یکپارچه شده است، و شرایط عملیاتی در کاربرد دریایی سخت است، همانطور که شکل ۳ مشاهده می‌کنید ساختارهای مختلف سیستم قدرت شناور، اجزای آن که متشکل از ماژول تولید انرژی، ادوات الکترونیک قدرت، بارهای خدماتی، توان بالا و ... و موتورهای الکتریکی و پروانه و قسمت پیشرانس را در آن مشخص کرده است.

### ۲-۱ عملکرد ولتاژ

کیفیت توان با انحراف ولتاژ شین از ولتاژ شین مرجع نشان داده می‌شود که تابع هزینه بر همین اساس به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Cost_{vol} = \sum_{k=1}^N (v_{dc}(k) - v_{dc}^{ref})^2 \quad (5)$$

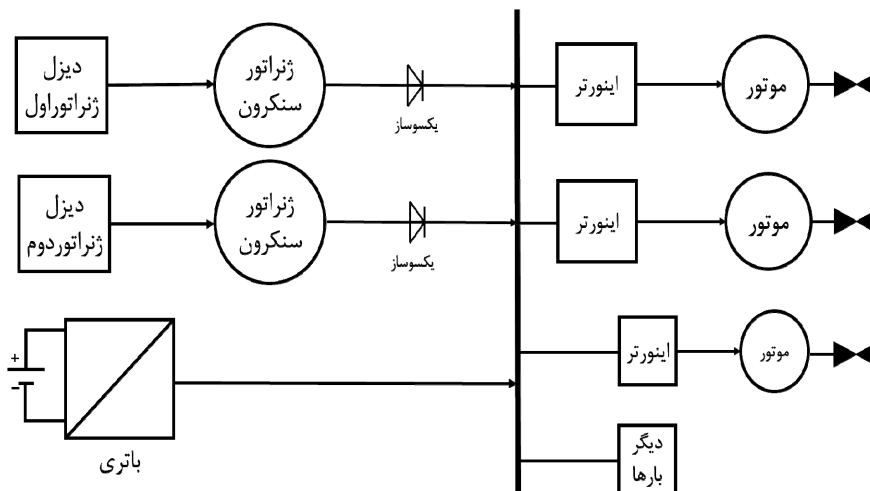
دینامیک کلی یک مدل کلی غیرخطی MVDC SPS را می‌توان با معادله دیفرانسیل-جبری غیرخطی زیر (DAE) توصیف کرد:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), t), & x(0) &= x. \\ g(x(t), y(t)) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

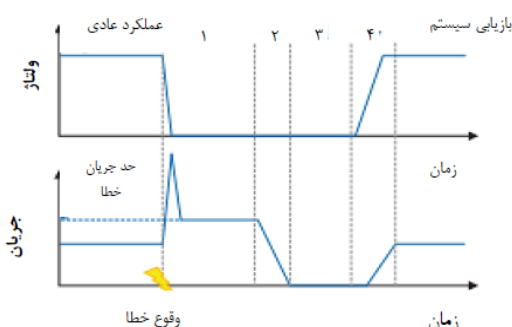
که در آن  $x(t) \in R^n$  بردار متغیرهای حالت موجود در اجزای دینامیکی سیستم مانند توربین‌های گاز، ماشین‌های سنکرون و محرکه‌ها است.  $u(t) \in U \subset R^m$  ورودی‌های کنترل و  $y(t)$  بردار متغیرهای حالت جبری مانند متغیرهای شبکه توزیع و سایر متغیرهای حالت جبری غیرخطی مرتبط با اجزای داخلی را نشان می‌دهد که در آن هیچ مشتقی وجود ندارد.  $x$  بردار مقادیر اولیه برای متغیرهای حالت است.

سیستم توصیف شده توسط (۳) در شکل ۲ را می‌توان در زمان گسسته با زمان نمونه برداری  $k$ ، به منظور طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین به صورت زیر نوشت [۱۳]:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f(x(k), u(k), k), & x(0) &= x. \\ g(x(k), y(k)) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$



شکل ۴: دیاگرام تک خطی شبکه DC شناور [۱۵].



شکل ۶: فرایند مدیریت خطا [۱۶].

SMGها شبیه به زیر شبکه های زمینی است. ولتاژ و جریان منبع در شکل ۶ آورده شده است. هدف از مدیریت خطا حفاظت از سیستم و برگشت به حالت پایدار است. روش برای هر فرآیند حفاظتی در این بخش مورد بحث قرار گرفته است [۱۶].

همانطور که بیان شد هدف اصلی مدیریت خطا حفظ پایداری سیستم است که با توجه به شکل ۶ که مشخصه ولتاژ و جریان در شرایط مختلف در زیر شبکه DC شناور نشان داده شده است، هدف اصلی کاهش مرحله چهارم نمودار جریان یعنی بازیابی انرژی است که در هنگام بروز خطا (که می تواند ایجاد اتصال کوتاه یا کشیده شدن یک بار پالسی در مدت زمان کوتاه و ... باشد) اتفاق می افتد. مشخصه جریان سیستم در چهار مرحله تغییر حالت داده که متناسب با آن مشخصه ولتاژ نیز تغییراتی می کند که در شکل ۶ نشان داده شده است.

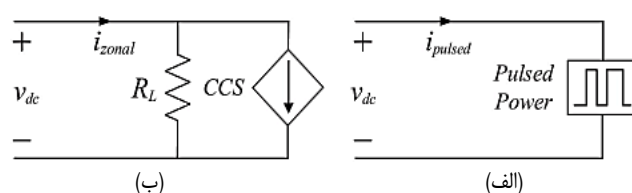
#### ۴-۲ مدل ریاضی ذخیره ساز انرژی

همان طور که در شکل ۷ مشاهده می کنید مدل ریاضی ذخیره ساز انرژی که یک ابرخازن است به صورت یک مقاومت و خازن ساده شده است که معادلات بر اساس جریان و ولتاژ خازن به صورت (۷) بیان شده است.  $v_{dc}$  ولتاژ لینک DC است که خروجی ذخیره ساز انرژی را به لینک DC متصل می کند.

$$i_{cap} = \frac{v_{dc} - v_{sc}}{R_s} \quad (7)$$

$$\frac{dv_{sc}}{dt} = \frac{v_{dc} - v_{sc}}{C_s R_s} - \frac{v_{sc}}{C_s R_p}$$

$i_{cap}$  جریان و  $v_{sc}$  ولتاژ خازن است. همچنین ولتاژ لینک DC  $v_{dc}$



شکل ۵: مدل استفاده شده برای بار، (الف) پالس اعمالی به سیستم و (ب) استفاده از منبع جریان وابسته به عنوان معادل بار پالسی.

که  $v_{dc}(k)$  متغیر حالت تعریف شده در مدل مذکور زمان نمونه  $k$  نشان می دهد.  $N$  آخرین مرحله زمانی است. هدف کنترل کننده به حداقل رساندن تابع هزینه فوق به منظور حفظ ولتاژ شین، نزدیک به مقدار مرجع است.

در ادامه به معرفی اجزاء و ادوات مختلف استفاده شده در این ساختار پرداخته شده است و انواع مختلف هر کدام از این زیرسیستم ها آورده شده است.

#### ۲-۲ مدل بار استفاده شده در شبیه سازی

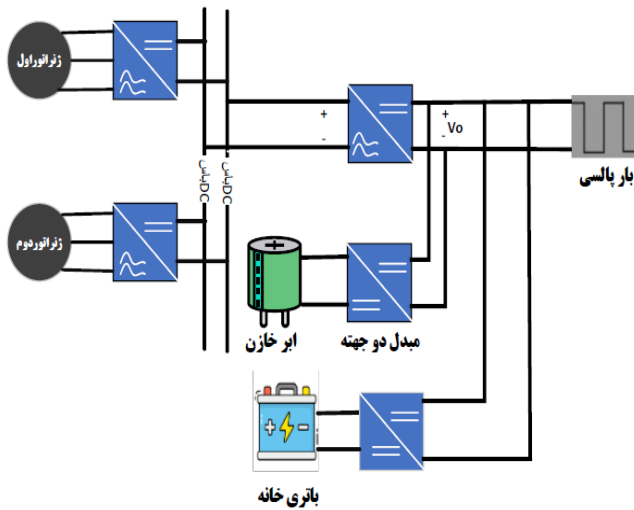
بارهای مختلفی در شبیه سازی استفاده شده است که از جمله آنها می توان به بارهای خدمتی و بارهای توان بالا و بارهای پالسی اشاره کرد که بار پالسی به صورت منبع جریان وابسته در شکل ۵ به صورت مدل نشان داده شده است.

می توان با داشتن جریان از (۶) مقدار توان بار پالسی را محاسبه کرد و همچنین بالعکس.

$$i_{PULSED} = \frac{P_{PULSED}}{V_{dc}} \quad (6)$$

#### ۳-۲ شماتیک حافظتی

سیستم حفاظتی SMG باید حساسیت تشخیص خطا، سرعت رفع و برطرف کردن خطا، صرفه جویی و سادگی را برآورده کند. با این حال، موانعی برای برآورده ساختن این خواسته ها وجود دارد. همانطور که در بخش های قبلی معرفی شد، PPLها توان گذاری زیادی را جذب می کنند. بنابراین، جریان ممکن است باعث عملکرد نادرست رله ها و مدارشکن ها شود. علاوه بر این، طراحی سیستم های زمین در شناورها به دلیل نداشتن زمین واقعی دشوار است. بدنه را به عنوان زمین، با مقاومت بالا یا یک نقطه خنثی به زمین در نظر گرفته می شود. فرآیند مدیریت خطا در DC



شکل ۸: مدل DC شناور به همراه بار پالسی و مبدل دوجته.

### ۳-۱ یکسوساز

از کنترل‌کننده PID در دو بخش استفاده شده است که می‌توان به بخش کنترل کانورتور (یکسوساز) یعنی کنترل مدولاسیون یکسوساز برای تولید پالس گیت برای سوئیچ‌های هر ساق یکسوساز و تولید پالس برای کنترل ولتاژ خروجی مبدل دوجته که ویژگی‌های روش کنترلی و بخش‌های مختلف آن در ادامه آورده شده اشاره کرد.

همان‌طور که در ژنراتور سنکرون بدون موتور دیزلی گاورنر را از طریق یکسوکننده‌های فعال به باس DC متصل می‌کنند. در حالت DC، دیزل ژنراتورها باید با سرعت نامی کار کنند و ژنراتورها توان نامی را تولید می‌کنند تا حداکثر راندمان حاصل شود. در این حالت، دیزل ژنراتورها منابع اصلی انرژی هستند و توان اکتیو مرجع برابر با توان نامی شبکه است و منابع انرژی کمکی نقش کنترل ولتاژ و تأمین توان مصرفی بار پالسی را دارند و معماری کنترل توزیع‌شده در ساختار مبدل دوجته مورد استفاده قرار گرفته است.

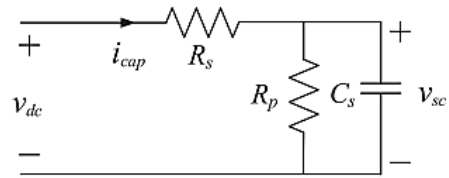
یکسوساز شش‌پالسه با سوئیچ‌های کنترل‌شونده که باتوجه به الگوریتم کنترلی که در بخش قبلی توضیح داده شد توسط الگوریتم کنترلی که بلوک‌های شبیه‌سازی در Matlab در شکل ۱۰ نشان‌داده شده اعمال می‌گردد. ولتاژ AC شبکه ولتاژ DC و مقادیر جریان و ... ورودی بلوک PWM برای تولید پالس گیت برای یکسوساز هستند.

شکل ۱۱ مدل سیمولینکی یکسوساز شش‌پالسه را نمایش می‌دهد که پالس گیت‌های آن توسط بلوک PWM تولید می‌شود.

در ادامه در شکل ۱۲ پالس اعمالی به سوئیچ‌های یکسوساز و ولتاژ تبدیل‌یافته به محور  $d$  و  $q$  در حلقه کنترلی ولتاژ را مشاهده می‌کنید. در ادامه در کنترل‌کننده بر روی یکسوساز نتایج به‌صورت شکل‌های زیر به‌دست آمده است که شکل‌های زیر نمودار خروجی بلوک‌های حلقه‌های کنترلی ولتاژ و جریان را نشان داده است. در ادامه نیز در جدول ۱ پارامترهای اعمالی به سیستم آورده شده است.

### ۳-۲ مبدل‌های DC/DC

مبدل DC/DC برای اتصال ESS به باس DC مورد نیاز است. مبدل DC/DC پل فعال دوگانه<sup>(۲)</sup> (DAB) به دلیل برخورداری از مزایای دوجته بودن شارش جریان، راندمان بالا، ساختار مدولار، ایزوله و



شکل ۷: مدار معادل ذخیره‌ساز انرژی (ایر خازن).

نوشته شده است. در نهایت معادلات ذخیره‌ساز انرژی به صورت (۷) به‌دست آمده است.

### ۲-۵ مبدل‌های DC/DC

مبدل DC / DC برای اتصال ESS به باس DC مورد نیاز است. مبدل DC / DC پل فعال دوطرفه<sup>(۱)</sup> (DAB) به دلیل داشتن مزایای دوجته بودن شارش جریان، راندمان بالا، ساختار مدولار، ایزوله و سوئیچینگ نرم، به‌طور رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷]. به‌طور مشابه، مبدل‌های مدولار چند سطحی DC / DC نیز انتخاب خوبی برای کاربردهای توان بالا هستند [۱۸]. در اینجا از دو مبدل باک استفاده شده است که در دو سطح ولتاژ را کاهش داده و بارهای DC را تغذیه می‌کنند. در یک ریزشبه‌ساز شناور که از مجموعه‌های تولید، باتری‌های ESS و انواع مختلف بارهای کشتی تشکیل شده است. ژنراتورها و باتری‌های ESS به صورت موازی به گذرگاه DC متصل هستند. بارهای کشتی شامل سیستم نیروی محرکه الکتريکی، بارهای خدمات کشتی، PPL و سایر بارهای اختصاصی با توان بالا است [۱۹]. نمودار یک DC SMG در شکل ۸ ارائه شده است که در آن بار پالسی به همراه منبع ذخیره‌ساز انرژی و سایر مشخصات و ویژگی‌های یک شبکه شناور در سمت DC نشان داده شده‌اند.

مدل ریاضی مبدل استفاده شده در شبیه‌سازی به‌صورت زیر است [۱۹]:

$$x_1 = e_v = v_o - v_o^* \quad (۸)$$

$$x_2 = x_1 = \frac{1}{C} \left( i_L - \frac{v_o}{R} \right) \quad (۹)$$

$$\dot{X} = AX + B \quad (۱۰)$$

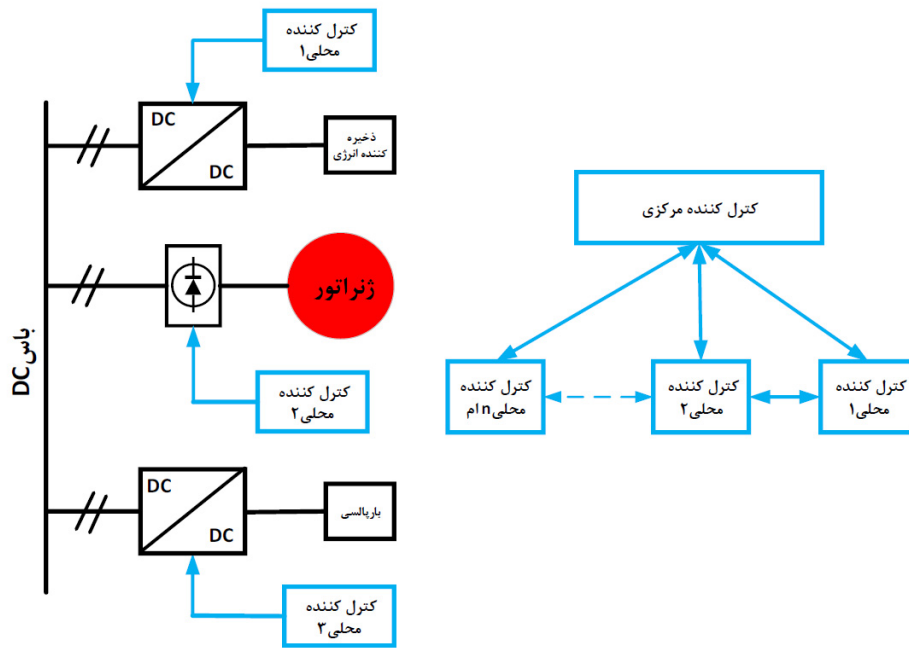
در ادامه ماتریس حالت مبدل به‌صورت (۱۱) نوشته می‌شود:

$$A = \begin{bmatrix} \cdot & 1 & \cdot \\ -1 & 1 & \cdot \\ L_1 C & RC & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \cdot \\ v_{in} \\ L_1 C \\ \cdot \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} \cdot \\ -v_o^* \\ L_1 C \\ \cdot \end{bmatrix}, \quad (۱۱)$$

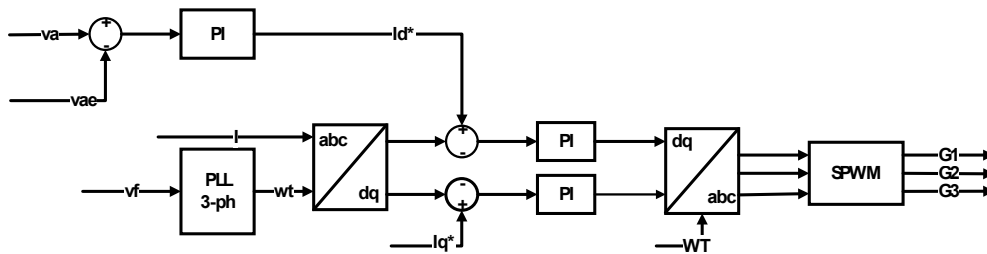
### ۳- کنترل منابع تولید توان

همان‌طور که در شکل ۹ نشان‌داده شده است منابع تولید توان از قبیل ژنراتور، ذخیره‌کننده‌های انرژی و ... باید توسط یک سیستم مدیریتی کنترل شوند و به همین منظور با توجه ساختار توزیع‌شدگی الگوریتم کنترلی، کنترل‌کننده‌های محلی با یک کنترل‌کننده مرکزی و همچنین با یکدیگر در ارتباط هستند.

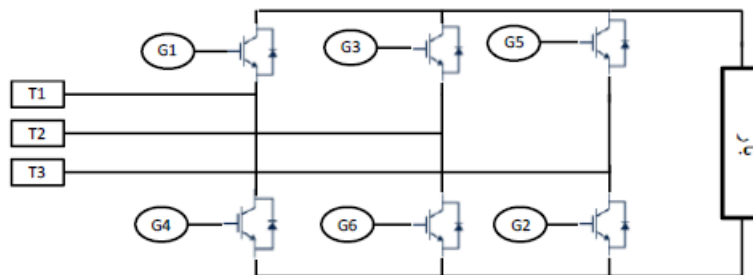
برای هر کدام از منابع تولید توان باید یک کنترل‌کننده طراحی شود که به همین منظور برای منابع ذخیره‌ساز انرژی مبدل‌های DC-DC دوجته و برای یکسوسازها، کنترل‌کننده یکسوساز AC-DC انجام شده است که در ادامه به‌تفصیل توضیح داده شده است.



شکل ۹: ساختار کنترلی اعمالی بر منابع انرژی و مدیریت کلی سیستم.



شکل ۱۰: الگوریتم کنترلی مورد استفاده برای پل یکسوسازی.



شکل ۱۱: یکسوساز شش پالس به همراه تولید پالس فرمان سوئیچ‌ها.

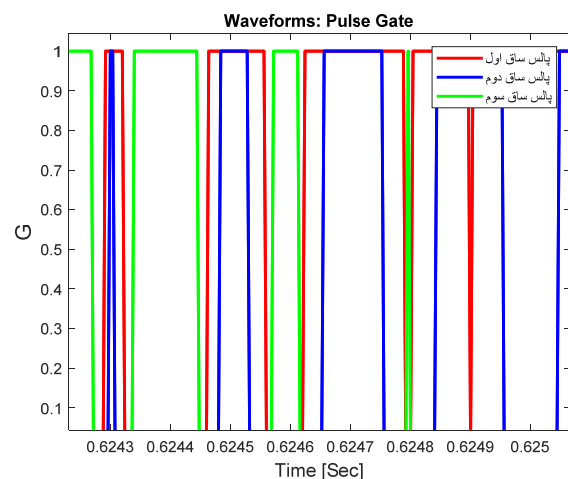
سوئیچینگ نرم، به طور رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اتصال چندگانه یک DAB، ظرفیت توان مبدل را می‌توان به راحتی افزایش داد. به طور مشابه، مبدل‌های مدولار چندسطحی DC/DC نیز انتخاب خوبی برای کاربردهای توان بالا هستند [۱۴].

برای اینکه کنترل توزیع شده مبدل‌های DC-DC را پیاده سازی کنیم باید در قسمت منبع تولید توان کمکی سیستم قدرت شناور که از منبع ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است تلاش کنترلی که در اینجا دوره کاری مبدل‌ها است را هدف کنترلی قرار داده و توزیع شدگی بین این متغیر انجام شود که در ادامه در مورد کنترل توزیع شده توضیح داده شده است.

#### ۴- کنترل پیش‌بین توزیع شده

##### ۴-۱ کنترل پیش‌بین

الگوریتم کنترل پیش‌بین را برای مدیریت سیستم قدرت شناور DC



شکل ۱۲: نمودار پالس اعمالی به ساق‌های یکسوساز.

$$J_k = \sum_{K=0}^{N-1} L(x(k+i), u(k+i-1)) \quad (13)$$

باتوجه به محدودیت‌های حالت  $\Psi(x(k)) < 0$ ، محدودیت‌های ورودی کنترل و محدودیت‌های دینامیکی به طور معمول، یک تابع هدف که "هزینه" را به حداقل می‌رساند. در اینجا، تابع هزینه نقطه تنظیم زیر استفاده می‌شود:

$$L(x(k), u(k-1)) = (x(k) - x^*(k))_Q^T + \|u(k-1)\|_R^2 + \|\Delta u(k-1)\|_R^2 \quad (14)$$

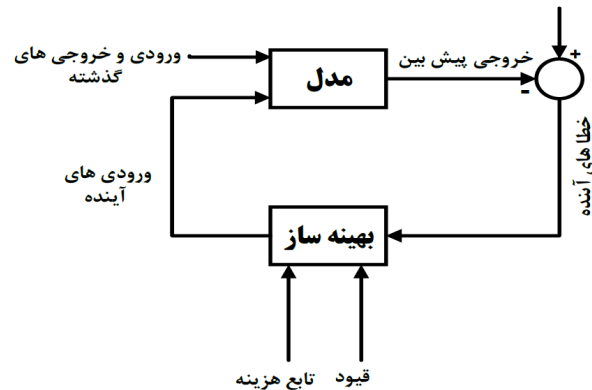
که در آن  $\|\cdot\|$  نشان دهنده نرم اقلیدسی است.  $R, Q$  و  $R^*$  ماتریس‌های وزنی هستند.  $\Delta u(k)$  نشان‌دهنده تغییرات ورودی‌های کنترل است و  $x^*(k)$  مقدار مطلوب بردار متغیر حالت در مرحله زمانی  $k$  است.

در این مقاله از حل‌کننده `fmincon` در Matlab برای یک مسئله بهینه‌سازی چندمتغیره غیرخطی استفاده می‌شود. این حل‌کننده شامل چهار الگوریتم بهینه‌سازی است: `interior-point (default)`، `trust-`، `region-reflective`، `SQP`، and `active-set` که با تنظیم گزینه‌ها در تابع `fmincon` قابل انتخاب هستند. توجه داشته باشید که `fmincon` یک روش مبتنی بر گرادیان است که برای کار بر روی مسائلی طراحی شده است که در آن توابع هدف و محدودیت هر دو پیوسته و دارای مشتقات اول پیوسته هستند که در این تحقیق از روش `SQP` استفاده شده است.

#### ۴-۲ کنترل پیش‌بین توزیع‌شده

در کنترل پیش‌بین ساختار کنترل چند سیستم به صورت کلی به سه دسته متمرکز، غیرمتمرکز و توزیع شده تقسیم‌بندی می‌شود که بر اساس نوع ارتباط زیرسیستم‌ها با هم و تابع هزینه سیستم تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های کنترلی مختلفی برای سیستم‌های چند عامله وجود دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است ساختار کنترل چند سیستم به صورت کلی به سه دسته متمرکز، غیرمتمرکز و توزیع شده تقسیم‌بندی می‌شود که بر اساس نوع ارتباط زیرسیستم‌ها با هم و تابع هزینه سیستم تقسیم‌بندی شده‌اند.

یکی از مزایای اصلی کنترل توزیع شده نسبت به سایر روش‌ها رفتار تحمل خطا<sup>۱</sup> و مقاومت خوب<sup>۲</sup> آن است. این بدان معناست که اگر یک خطای غیرمنتظره در یک زیرسیستم رخ دهد، سایر کنترلهای محلی همچنان می‌توانند کار کنند و کل سیستم تحت‌تأثیر خطای احتمالی قرار نمی‌گیرد. انعطاف‌پذیری بالا یکی دیگر از مزایای مهم ساختار توزیع شده است. این ساختار هرگونه گسترش و نگهداری<sup>۳</sup> سیستم کنترل را ساده می‌کند. از دیگر مزایای آن اگر یک زیرسیستم جدید به سیستم فعلی اضافه شود، فقط باید زیرسیستم‌هایی را که با زیرسیستم جدید تعامل دارند اصلاح کرد. علاوه بر مزایای گفته شده پیاده‌سازی یک ساختار توزیع شده به دلیل نیازهای محاسباتی کمتر آن آسان‌تر است. این به این دلیل است که یک مشکل پیچیده با چندین مسئله در مقیاس کوچک‌تر جایگزین می‌شود [۱۸].



شکل ۱۳: ساختار کلی عملکردکنترل پیش‌بین.

غیرخطی پیشنهاد شده است. کنترل‌کننده مبتنی بر MPC برای کنترل سیستم قدرت شناور DC در هنگام داشتن بار پالسی با توان بالا طراحی شده است. MPC غیرخطی همچنین برای رسیدن به کمترین هزینه و خطای کمتر با استفاده از تابع هزینه مناسب، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته را تضمین می‌کند. قبل از ارائه پیشینه مطالعات انجام شده در این فصل، مبانی رویکرد کنترل پیش‌بینی مدل در بخش زیر توضیح داده شده است.

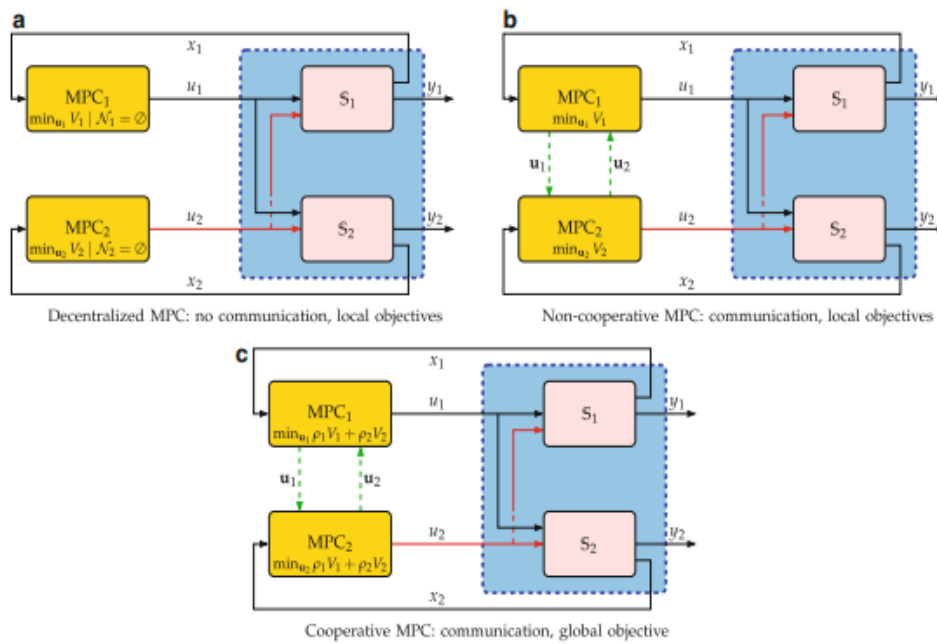
کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) یک رویکرد مبتنی بر مدل است که از مدل سیستم برای پیش‌بینی متغیرهای حالت آینده استفاده می‌کند و با بهینه‌سازی یک تابع هدف با قیدهای عملیاتی، یک دنباله کنترل بهینه را در افق پیش‌بین  $h$  ایجاد می‌کند. فقط اولین عنصر در دنباله کنترل بهینه در لحظه  $k$  به سیستم اعمال می‌شود و باقی‌کنار گذاشته می‌شود [۱۶]. MPC را قادر می‌سازد تا با ترکیب مدلی از سیستم که تأثیر اقدامات کنترلی را برای مدت‌زمان محدودی پیش‌بینی می‌کند، یک قدم فراتر از کنترل بهینه برویم؛ بنابراین در این روش اثرات آتی تصمیمات کنترلی به عنوان بخشی از مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. MPC می‌تواند تابع هزینه را به هر شکلی از جمله غیرخطی‌ها یا چندین هدف کنترلی و همچنین قیود مختلف مدیریت کند. وجود مدل سیستم یک شرط ضروری برای توسعه کنترل پیش‌بینی است. ساختار اصلی MPC در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌کنید قیود و تابع هزینه نیز در کنترل‌کننده نقش بسزایی دارند و درواقع یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که تأثیرگذار در معادلات است قیودی است که باید در مسئله توزیع توان در شناورها با کنترل پیش‌بین در نظر گرفت و به نحوی این قیود را در مقادیر توان خروجی تنظیم کرد که در صورت اعمال پارامترهای کنترلی اعمالی از سوی کنترل‌کننده، سیستم بتواند به خوبی مقدار ولتاژ خروجی و در نتیجه توان دریافتی از منابع مختلف را با مدیریت درستی که کنترل‌کننده انجام داده دریافت کند و خللی در سیستم تغذیه شناور وجود نداشته باشد.

تابع هدف کلی برای MPC غیرخطی به شرح زیر است:

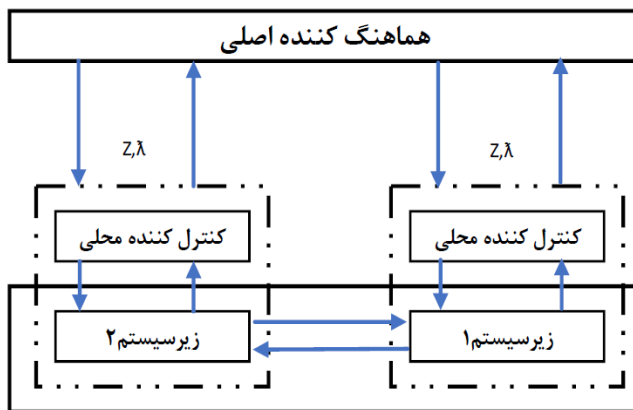
$$J = \sum_{K=0}^{N-1} L(x(k+1), u(k)) \quad (12)$$

که در آن  $L$  یک تابع غیرخطی را نسبت به  $x$  و  $u$  نشان می‌دهد و  $N$  آخرین مرحله زمانی است. در هر مرحله زمانی  $k$ ، پیش‌بینی‌ها و دنباله کنترل بهینه در یک افق پیش‌بینی محدود  $h$  محاسبه می‌شوند؛ بنابراین تابع هزینه زیر در هر مرحله زمانی  $k$  به حداقل می‌رسد:

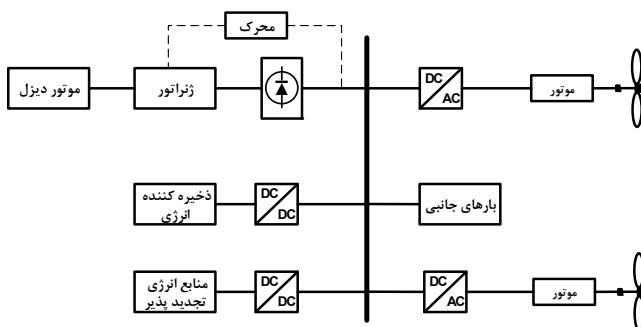
1. Error-Tolerance Behavior  
2. Robustness  
3. Maintenance



شکل ۱۴: انواع روش های کنترلی چندعامله [۱۷].



شکل ۱۵: کنترل توزیع شده برای دو زیرسیستم.



شکل ۱۶: نمای کلی از ریزشبکه شناور.

### ۱-۵ سناریوی اول

حالت عادی شناور در حضور چندین نوع بار DC است که مدل سازی شده است و نمای کلی مدل سیستم به صورت شکل ۱۶ است. در این سناریو در هر مرحله زمانی مشخص که در شکل های ادامه مشخص شده است بارهای خدماتی مشخصی به سیستم اضافه شده و مدیریت توان شناور توسط منبع اصلی تولید توان یعنی ژنراتور بررسی می شود و در ولتاژ لینک DC، ولتاژ و جریان منبع AC و دیگر نتایج شبیه سازی نشان داده شده است.

### ۳-۴ الگوریتم پیش بین توزیع شده

در ادامه گام های زیر برای رسیدن به یک الگوریتم کنترل پیش بین آورده شده است که به صورت زیر است:

۱- در ابتدا زیرسیستم ها شروع به فرستادن دیتا یا اطلاعات خود برای هماهنگ کننده اصلی می فرستند و مقادیر اولیه توسط هماهنگ کننده برای هر کدام از زیرسیستم ها فرستاده می شود.

۲- هر کدام از پیش بین های محلی می توانند به صورت جدا یا به طور کلی در یک الگوریتم که در اینجا کنترل پیش بین است بهینه سازی را انجام دهند.

۳- سپس مقادیر بهینه سازی شده هر زیر سیستم دریافت می شود و متغیرهای آینده جایگزین می شوند.

۴- مقدار خطا محاسبه می شود.

۵- مقادیر برای مرحله بعد شبیه سازی به روز رسانی می شود.

۶- مقادیر به روز شده به برای همه زیرسیستم ها ارسال می شود.

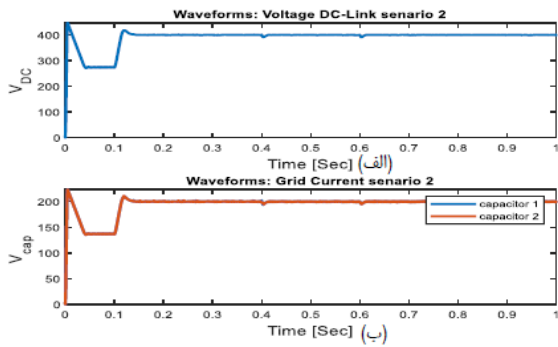
۷- مراحل ۲ تا ۶ به تعداد مورد نیاز که خطا را به کمترین مقدار برساند تکرار می شود.

در شکل ۱۵ سیستم با کنترل توزیع شده را مشاهده می کنید که از دو زیر سیستم با متغیرهای  $Z$  و  $\lambda$  را بین هماهنگ کننده اصلی به اشتراک گذاشته و مقادیر جدید را برای رسیدن به کمترین خطا دریافت می کنند.

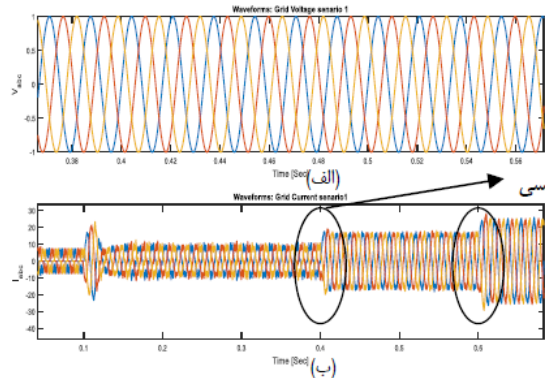
### ۵- شبیه سازی و تحلیل نتایج

با توجه به این موضوع که کنترل و مدیریت توان در مواقع اضطراری در شناورها هدف و غایت این تحقیق بوده است؛ لذا بار پالسی به عنوان شرایط نامطلوب در نظر گرفته شده است و مبنای انتخاب سه سناریو میزان پایداری و مدیریت توان در شناور در سه سناریوی اعمالی به سیستم است. به همین منظور در حالت های مختلف این بار پالسی به سیستم اعمال شده است و نتایج آن در ادامه توضیح داده شده است.

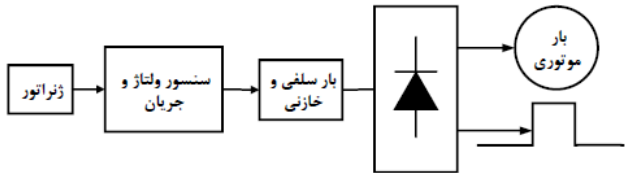




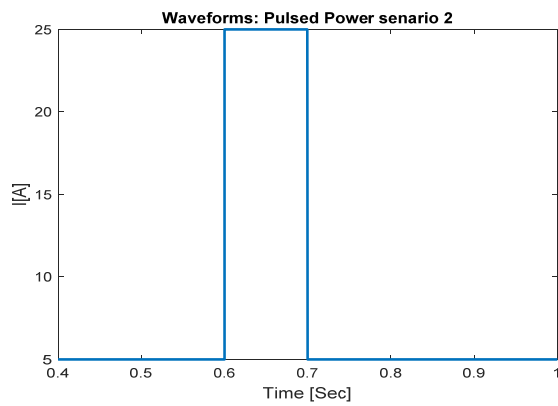
شکل ۲۰: (الف) ولتاژ لینک DC و (ب) ولتاژخازن‌های فیلتر.



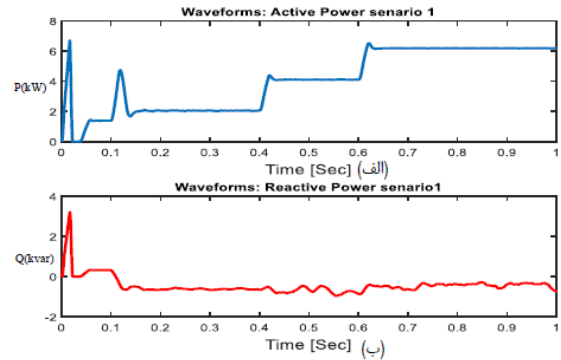
شکل ۱۷: (الف) ولتاژ و (ب) جریان شبکه AC (بزرگنمایی).



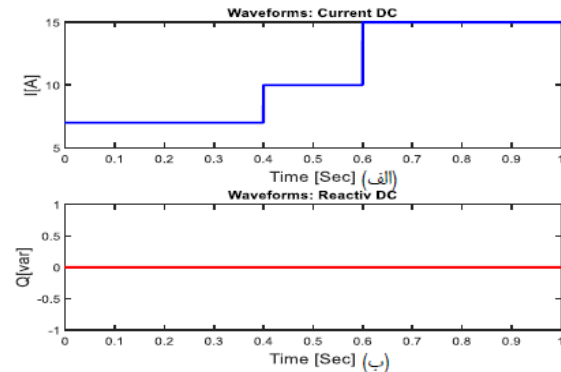
شکل ۲۱: مدل کلی شبیه‌سازی شده شناور.



شکل ۲۲: نمودار پالس جریان کشیده در سناریوی دو.



شکل ۱۸: (الف) توان اکتیو و (ب) توان راکتیو کشیده شده از سمت AC.



شکل ۱۹: (الف) نمودار جریان لینک DC و (ب) نمودار توان راکتیو در سمت DC.

به دلیل وجود شبکه DC بعد از یکسوساز توان راکتیو خروجی لینک DC صفر است و می‌توان نتایج تغییرات در توان راکتیو شبکه لینک DC را در شکل ۱۹ مشاهده کرد.

در ادامه شکل ۲۰ ولتاژ لینک DC در طی آزمایش سناریوی اول را نشان می‌دهد. که شکل ۲۰-الف نمودار ولتاژ لینک DC و شکل ۲۰-ب نمودار ولتاژ خازن‌های فیلتر خروجی است. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌گردد تغییرات بار و میزان توان آن در ثانیه‌های اعمالی به وضوح نشان دهنده‌ی کاهش ولتاژ در شبکه قدرت شناور بوده که طولانی‌بودن این زمان باعث اختلالاتی در شبکه شناور شده و خاموشی سراسری در شناور را به دنبال خواهد داشت.

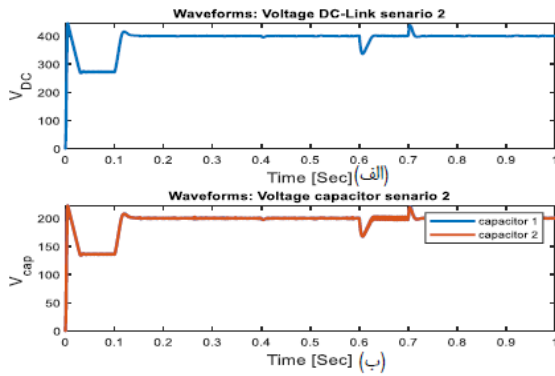
در نتیجه می‌توان گفت که تغییرات توان بارهای توان پایین در هنگام اضافه‌شدن به شبکه شناور تأثیر جزئی و ناچیزی روی شبکه داشته و با کنترل‌کننده مناسب می‌توان این ناپایداری در توازن توان را جبران و ولتاژ خروجی را در ولتاژ ثابت لینک DC بدون تغییر حفظ کرد.

### ۲-۵ سناریوی دوم

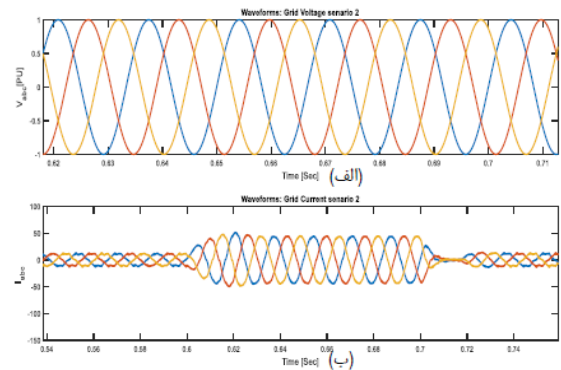
در این سناریو زیر شبکه شناور در حالت غیرطبیعی و در شرایط یک‌بار پالسی در مدت‌زمان ۰/۱ ثانیه در شبکه بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود مدل سیستمی شناور در نرم‌افزار Matlab توسط بلوک‌های آن شبیه‌سازی گردیده است که متشکل از چند بخش است که توضیحات در مورد هر کدام از بلوک‌ها و نحوه‌ی فرمول‌بندی

همان‌طور که در شکل‌های بعدی مشاهده می‌شود نمودار ولتاژ و جریان شبکه AC آورده شده است و تغییرات مختلف در زمینه تغییرات بار نشان‌داده شده است. مقادیر توان اکتیو راکتیو شبکه AC نیز ارائه گردیده است. تغییرات جریان اعمالی به شبکه DC شناور به صورت شکل ۱۵ است که در زمان‌های ۰/۴ ثانیه و ۰/۶ ثانیه اعمال شده است و تغییرات بار را در سمت DC شبکه نشان می‌دهد. ولتاژ و جریان در سمت AC در شکل ۱۷ نشان‌داده شده است که میزان تغییرات در سمت جریان AC نشان‌دهنده توانایی سیستم در کنترل توان و پایداری ولتاژ و عملکرد صحیح سیستم در تأمین توان در خواستی از سوی بار توسط منبع تولید توان است.

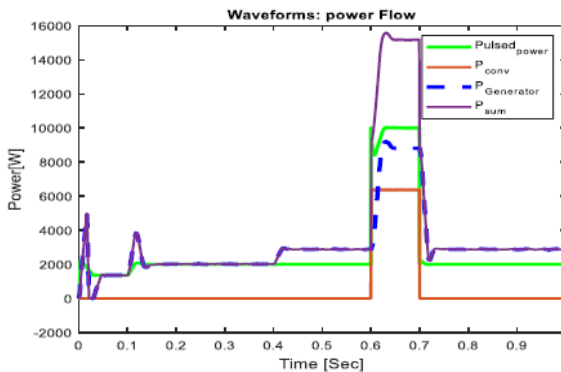
شکل ۱۸ نمودارهای توان اکتیو و راکتیو بر حسب کیلووات کشیده شده از شبکه منبع را نمایش می‌دهد. این تغییرات، گویای اعمال بار به شبکه در سمت DC بوده که تقاضای توان بیشتری از سمت AC را به دنبال داشته و با کنترل‌کننده در یکسوساز این مقدار افزایش توان با اعمال سیگنال کنترلی مناسب تضمین گردیده و شبکه با افت توان مواجه نخواهد شد.



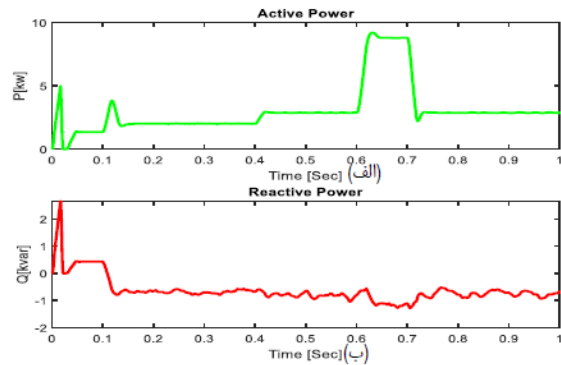
شکل ۲۵: (الف) ولتاژ لینک DC و (ب) ولتاژ خازن‌های فیلتر لینک DC.



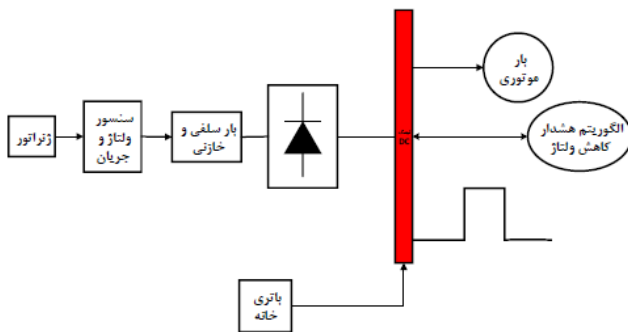
شکل ۲۳: (الف) ولتاژ و (ب) جریان در شبکه AC (بزرگنمایی)



شکل ۲۶: پخش توان از منابع مختلف تولید توان در هنگام توان پالسی.



شکل ۲۴: (الف) توان اکتیو و (ب) توان راکتیو کشیده شده از شبکه AC.



شکل ۲۷: نمای کلی شبکه شناور به همراه ذخیره‌ساز انرژی.

مجموع توان باعث پایداری در ولتاژ و توازن توان در شبکه شناور می‌شود.

### ۳-۵ سناریوی سوم

در این حالت ریز شبکه شناور در حالت بار پالسی بررسی شده است که توان مورد نیاز برای بار مدت‌زمان بیشتری در مدار است که دیگر کنترل‌کننده به دلیل محدودیت توان ژنراتورها قادر به مدیریت توان نیست و نیاز به یک منبع تولید کمکی با مدت‌زمان بیشتری در شبکه است که به همین منظور باز هم از یک منبع ذخیره انرژی استفاده شده است. مقدار جریان کشیده شده از شبکه توسط مبدل دوجبهته در ابرخازن ذخیره شده و پیک جریان گرفته می‌شود و افت ولتاژ نیز توسط باتری که منبع کمکی (ذخیره‌ساز انرژی) است جبران می‌شود. در ادامه زیربخش‌های توضیح داده شده در شکل ۲۷ آمده است. همچنین پیاده‌سازی آن در سیمولینک Matlab در شکل ۲۸ نشان داده شده است.

کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) یک رویکرد مبتنی بر مدل است که از مدل سیستم برای پیش‌بینی متغیرهای حالت آینده استفاده می‌کند و با بهینه‌سازی یک تابع هدف با قیدهای عملیاتی، یک دنباله کنترل بهینه را

ریاضی و اجزای آن در قسمت‌های قبل ارائه شده است. در سناریوی قبل بارهای توان پایین مورد بررسی قرار گرفت؛ اما در این سناریو بار پالسی به سیستم اعمال می‌شود که به دلایل مختلف از جمله بارهای چالش‌زا در شبکه شناور بوده که باعث ناپایداری در توازن توان تولیدی مصرف شده در نتیجه مقدار ولتاژ خروجی لینک DC را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

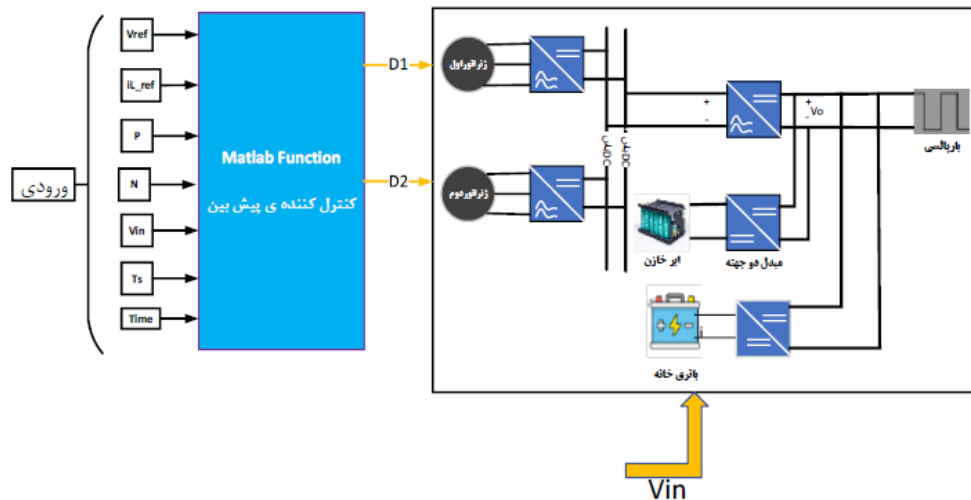
در ادامه نمودار ولتاژ و جریان شبکه در حالت استفاده از بار پالسی را نشان می‌دهد که شبکه شناور به مدت ۰/۱ ثانیه تحت تأثیر بار پالسی قرار گرفته تا عملکرد کنترل‌کننده‌ها در تأمین توان توسط منبع تولید توان و قادر بودن ژنراتورها به تولید توان اضافی مورد بررسی قرار بگیرد. بعد از اتمام زمان بار پالسی مدتی بعد سیستم به حالت اولیه خود باز می‌گردد که برای جلوگیری از خاموشی در برق سراسر در زمان اعمال بار پالسی باید تدابیری اندیشید که در ادامه توضیح داده شده است. شکل ۲۲ نمودار پالس توان اعمال شده به شبکه را نشان داده است. همچنین در ولتاژ و جریان در سمت AC در هنگام اعمال بار پالسی نشان داده شده است.

شکل ۲۳ نمودار ولتاژ شبکه AC را نشان می‌دهد که در زمان اعمال پالس، شبکه متحمل جریان زیادی شده و بعد از پایان بار پالسی در زمان ۰/۷ ثانیه شبکه به حالت پایدار برگشته است.

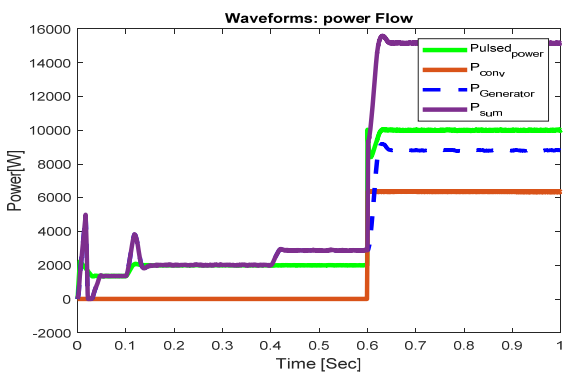
در شکل ۲۴ توان‌های اکتیو و راکتیو سمت AC در اثر تغییرات بار به-نمایش درآمده است. این تغییرات به نحوی است که میزان توان مصرف از تولید بیشتر بوده و نیاز به استفاده از منابع کمکی تولید توان برای جلوگیری از خاموشی و قطع برق در شناور است.

شکل ۲۵ ولتاژهای لینک DC خازن‌های لینک DC را نشان می‌دهد که مجموع مقدار ولتاژ DC آنها در نهایت برابر با ولتاژ لینک DC است.

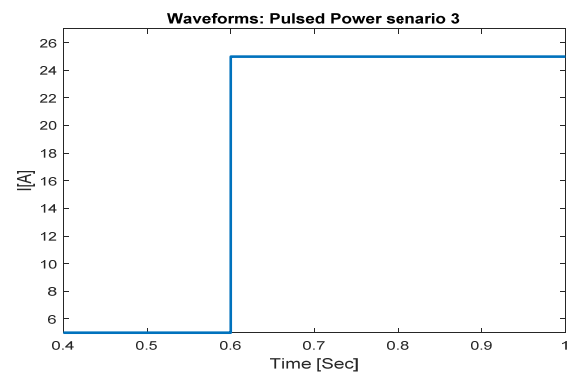
در نهایت در شکل ۲۶ نحوه تقسیم توان در هنگام اعمال بار پالسی نشان داده شده است که می‌توان گفت که میزان توان تولیدی توسط ژنراتور به اندازه توان مصرفی بار کافی نبوده و توان کمکی منبع ذخیره‌ساز انرژی به واسطه مبدل دوجبهته به سیستم تزریق می‌شود و



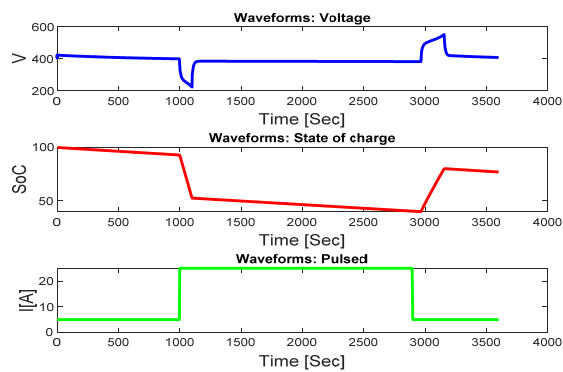
شکل ۲۸: نمای کلی مدلسازی میدل به همراه کنترل پیش‌بین توزیع‌شده.



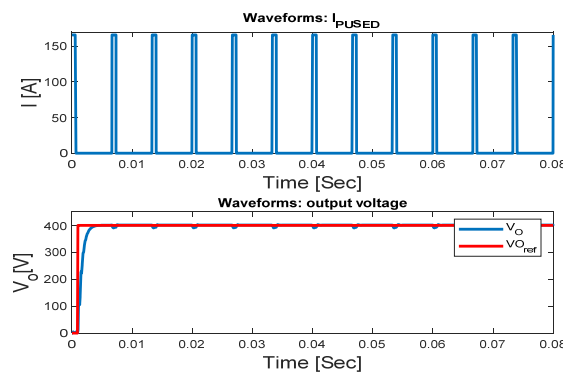
شکل ۱: پخش توان در از منابع مختلف تولید توان در هنگام اعمال بار توان بالا.



شکل ۲۹: نمودار جریان کشیده شده از شبکه DC در لحظه افت ولتاژ.



شکل ۳۱: نمودار ولتاژ و ظرفیت باتری و میزان جریان اعمالی به پک باتری به ترتیب از بالا به پایین.



شکل ۳۲: نمودار ولتاژ خروجی میدل.

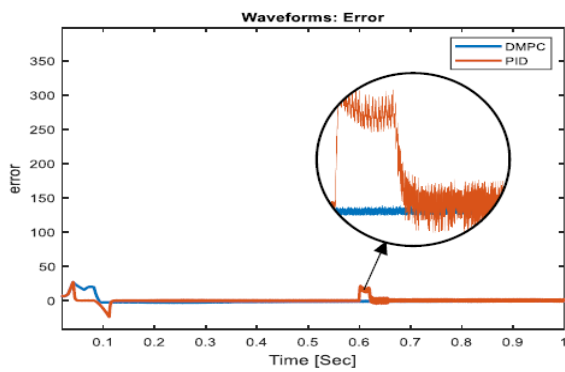
جدول ۱: پارامترهای کنترل پیش‌بین توزیع‌شده بین اعمالی به شبکه DC شناور.

متغیر	مقادیر	بلوک
Control Horizon (P)	۴	Matlab Function
Prediction Horizon (N)	۱۲	Matlab Function

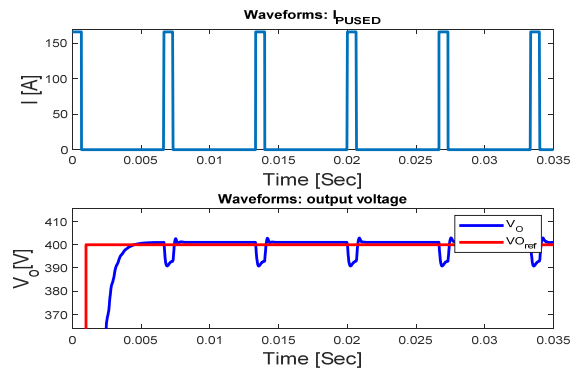
در افق پیش‌بین P ایجاد می‌کند. فقط اولین عنصر در دنباله کنترل بهینه در لحظه N به سیستم اعمال می‌شود و باقی کنار گذاشته می‌شود که در جدول ۱ این پارامترها بر اساس شرایط و مشخصات سیستم مشخص و اعمال شده است.

میدل دو جهته و میدل باک استفاده شده که برای کنترل سوئیچ زنی آنها از روش توزیع‌شده و در واقع ساختاری بر مبنای تأثیر سایر عامل‌ها بر روی یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی سوم مدت زمان بیشتری توان از شبکه کشیده می‌شود و باتری مدت‌زمان بیشتری در شبکه است و زمان شارژ و تخلیه باتری هم در ادامه نشان‌دهنده شده است و شکل‌های مقایسه برای نشان‌دادن ناتوانی ژنراتور در تأمین میزان توان اعمالی به سیستم است. در شکل ۲۹ نمودار جریان کشیده‌شده از شبکه DC نشان‌دهنده شده است.

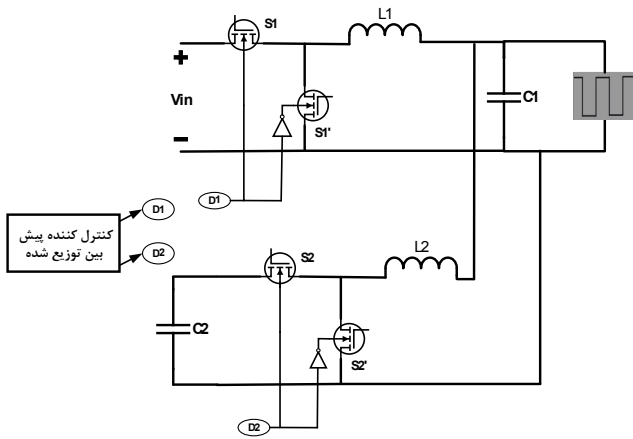
نمودار توان تولیدی قسمت‌های مختلف تولید توان که در مجموع توان تولیدی باتری و ژنراتور توانسته است توان مدنظر را تأمین کرده و توازن توان را برقرار کند. منبع ذخیره‌ساز انرژی که از باتری استفاده شده است به لینک DC متصل می‌شود و مقدار کاهش ولتاژ به‌واسطه مدیریت توان را جبران خواهد کرد (شکل ۳۰). شکل ولتاژ و SOC باتری را نشان می‌دهد. در این قسمت برای آزمون پک‌باتری در زمان طولانی مقیاس



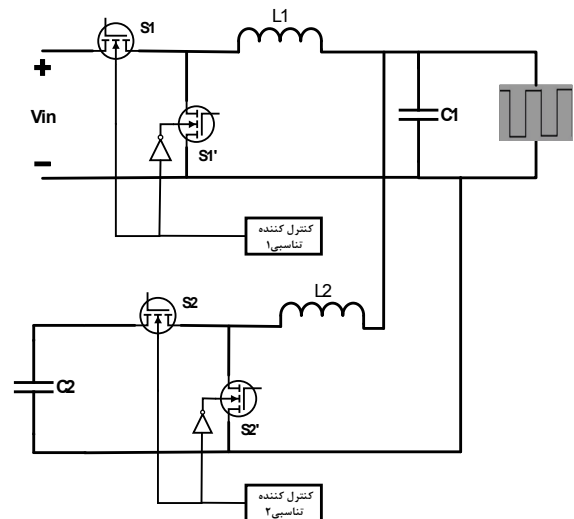
شکل ۳۵: نمودار ردیابی خطا ولتاژ با کنترل کننده PID.



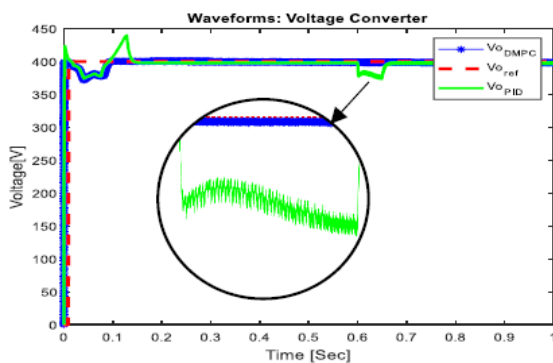
شکل ۳۳: نمودار ولتاژ خروجی مبدل (بزرگنمایی شده).



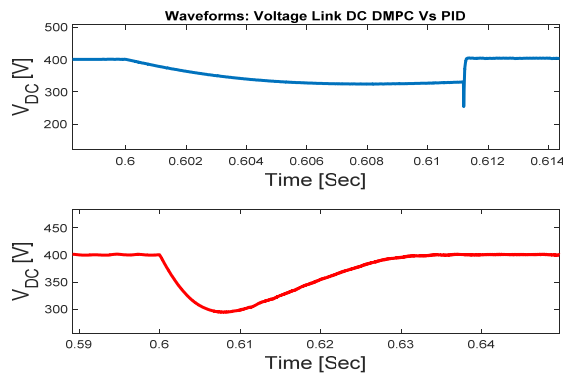
شکل ۳۶: مبدل دو جهته با کنترل DMPC.



شکل ۳۴: مبدل دو جهته با کنترل PID.



شکل ۳۷: نمودار ردیابی خطا ولتاژ با کنترل کننده PID.



شکل ۳۸: نمودار محاسبه زمان پاسخگویی به پالس اعمالی در (الف) کنترل کننده پیش-بین توزیع شده، و (ب) کنترل کننده تناسبی.

شکل ۳۸ مقایسه دو روش کنترلی یعنی کنترل تناسبی و پیش‌بین توزیع را از منظر زمان پاسخگویی به خطا و بازگشت به شرایط اولیه نشان می‌دهد.

زمانی تغییر کرده تا به‌خوبی شارژ و دشارژ (تخلیه) باتری هم مورد بررسی قرار گرفته باشد که در شکل زیر نمودار درصد شارژ باتری و ولتاژ آن را در اثر تغییرات پالس اعمالی به شبکه شناور مشاهده می‌کنید.

شکل ۳۲ پالس جریانی را برای حالتی که به تعداد بالا از شبکه کشیده شده نمایش می‌دهد. در این شکل ولتاژ خروجی به همراه عملکرد کنترل پیش‌بین توزیع شده برای حالت کاری سرعت بالای کنترل کننده قابل بررسی است. شکل ۳۳ نیز به صورت بزرگنمایی شده همان نمودارهای ولتاژ و جریان پالسی را نمایش می‌دهد.

## ۶- مقایسه روش‌های کنترلی

در شکل ۳۴ شبیه‌سازی مبدل‌ها توسط کنترل کننده PID نشان داده شده است که دو المان مختلف دو مدار توسط بلوک PID کنترل می‌شود. در شکل ۳۵ مقایسه ولتاژ خروجی مبدل دو جهته در دو روش کنترلی متفاوت یعنی کنترل PID و DMPC نشان داده شده است که همان‌طور که در شکل واضح است خطای PID از DMPC بوده و در هنگام اعمال پالس، تغییرات بسیار بیشتر بوده و به دلیل قابلیت پیش‌بین بودن در ساختار کنترل پیش‌بین توزیع شده نوسان ولتاژ بسیار کمتر بوده است.

در شکل ۳۶ شبیه‌سازی مبدل‌ها با کنترل پیش‌بین توزیع شده نشان داده شده است که شامل دو المان کنترلی برای کنترل این مبدل‌ها استفاده شده است. در ادامه مقایسه بین کنترل پیش‌بین توزیع شده و تناسبی را در ولتاژ خروجی مبدل آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۳۷ نشان داده شده است در حالت PID نوسان بیشتری وجود دارد و در زمان ایجاد پالس نتوانسته است به‌خوبی ولتاژ مرجع را دنبال کند.

جدول پ-۱: مشخصات پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌ها.

مقادیر	پارامتر	بلوک
۴۰۰	ولتاژ نامی (نامی)	DC Bus
۸۱۰	ولتاژ نامی (ولت)	
۵۰	ظرفیت (آمپر ساعت)	Battery Pack
۱۵	ماکزیمم جریان تخلیه (آمپر)	
۱۳۰	سلف (میلی هانری)	
۷۰	خازن (میلی فاراد)	
۲۰	فرکانس سوئیچینگ (کیلوهرتز)	DC-DC Converter
۰/۰۰۱	$k_p$	
۰/۰۲۶۵	$k_I$	
۸/۵	توان نامی (کیلووات)	
۲۹۶	ولتاژ خط‌به‌خط (ولت)	
۵۰	فرکانس (هرتز)	
۰/۸۷۵	$d$ -Axis Synchronous Reactance ( $X_d$ )	
۰/۱۹	$d$ -Axis Reactance Transient ( $X_{d'}$ )	Diesel Generator
۰/۱۳۶	$d$ -Axis Subtransient Reactance ( $X_{d''}$ )	
۰/۱۶۲۵	$q$ -Axis Synchronous Reactance ( $X_q$ )	
۰/۱۳۵	$q$ -Axis Reactance Subtransient ( $X_{q'}$ )	
۰/۰۱۶۳	Stator Leakage Reactance ( $X_l$ )	

effects of pulsed power loads in naval DC microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 7, pp. 5676-5685, Jul. 2019.

- [3] D. Perkins, T. Vu, H. Vahedi, and C. S. Edrington, "Distributed power management implementation for zonal MVDC ship power systems," in *Proc. 44th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 3401-3406, Washington, DC, USA, 21-23 Oct. 2018.
- [4] T. Goya, et al., "Coordinated control of energy storage system and diesel generator in isolated power system," *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 12, no. 1, Article ID: 2580, Jan. 2011.
- [5] X. Zhaoxia, et al., "Coordinated control of a hybrid-electric-ferry shipboard microgrid," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 5, no. 3, pp. 828-839, Sept. 2019.
- [6] H. M. Hasanien, "Design optimization of PID controller in automatic voltage regulator system using taguchi combined genetic algorithm method," *IEEE Syst. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 825-831, Dec. 2013.
- [7] Z. Jin, L. Meng, J. M. Guerrero, and R. Han, "Hierarchical control design for a shipboard power system with DC distribution and energy storage aboard future more-electric ships," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 2, pp. 703-714, Feb. 2018.
- [8] P. Xie, et al., "A distributed real-time power management scheme for shipboard zonal multi-microgrid system," *Applied Energy*, vol. 317, Article ID: 119072, Jul. 2022.
- [9] S. Kulkarni and S. Santoso, "Impact of pulse loads on electric ship power system: with and without flywheel energy storage systems," in *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symp.*, pp. 568-573, Baltimore, MD, USA 20-22 Apr. 2009.
- [10] L. Xu, et al., "A review of DC shipboard microgrids - part I: power architectures, energy storage, and power converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 5, pp. 5155-5172, May 2022.
- [11] A. Haseltalab, F. Wani, and R. R. Negenborn, "Multi-level model predictive control for all-electric ships with hybrid power

جدول ۲: مقایسه کلی نتایج به‌دست آمده از دو روش کنترلی اعمالی به سیستم الکتریکی شناور.

کنترل کننده تناسبی	کنترل پیش‌بین توزیع‌شده	پارامتر
۰/۲۴	۰/۱	زمان نشست
۰/۲۱ و ۰/۶ (دامنه = ۴۰)	۰/۰۰۵ (دامنه = ۱۰)	زمان خیز
۰/۱۷	۰/۰۷	زمان اوج
۳/۵۷۸	۰/۵۴۳۸	خطای حالت ماندگار

همان‌طور که مشاهده می‌کنید با اعمال بار پالسی به سیستم زمان پاسخ به افت ولتاژ به وجود آمده در ولتاژ خروجی لینک DC در کنترل پیش‌بین توزیع کمتر از کنترل تناسبی است که کادراهای مستطیلی شکل نشان‌دهنده زمان بازگشت سریع‌تر کنترل پیش‌بین توزیع شده به حالت اولیه و رفع خطای به وجود آمد است که در نتیجه می‌توان گفت در کنترل پیش‌بین توزیع شده، سیستم قدرت شناور پایداری بیشتری دارد.

همان‌طور که در مشاهده می‌کنید پاسخ‌گویی دو کنترل کننده تناسبی و پیش‌بین نشان داده‌شده است و با توجه به اینکه زمان اعمال بار پالسی ۰/۱ ثانیه است کنترل کننده‌ای بهتر است که در زمان مکفی یعنی کمتر از این زمان به اعمال بار پاسخ نشان داده و بتواند افت ولتاژ ایجاد شده در شبکه را جبران و در نتیجه مدیریت توان در شناور انجام شود. باتوجه‌به نتایج شبیه‌سازی برای مدیریت توان توسط دو ساختار ارائه شده می‌توان به نتایج جدول ۲ رسید.

## ۷- نتیجه‌گیری

این مقاله یک معماری کنترل توزیع‌شده برای یک سیستم قدرت غیرخطی شناور را پیشنهاد می‌کند. در ابتدا، مدل کلی شناور به چندین زیر سیستم به‌هم‌پیوسته تقسیم می‌شود. در سطح کنترل محلی، یک رویکرد کنترل پیش‌بینی مدل برای کنترل هر زیرسیستم انتخاب می‌شود. مسئله بهینه‌سازی برای هر MPC محلی بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی و آخرین متغیرهای تعاملی به‌دست‌آمده از زیرسیستم‌های دیگر باتوجه‌به وضعیت‌های زیرسیستم و محدودیت‌های ورودی حل می‌شود. هدف اصلی ارائه یک ساختار کنترلی به‌روز در سیستم‌های شناور برای کنترل ولتاژ و جریان با استفاده از دوره کاری میدل‌ها و یکسوساز در ورودی گذرگاه DC است که نتایج شبیه‌سازی نیز برای نشان‌دادن کارایی روش توزیع شده پیشنهادی ارائه شده است. مدل غیرخطی شناور به دو زیر سیستم تقسیم شده و تحلیل عملکرد ساختار توزیع شده در مقایسه با روش متمرکز با کنترل کننده تناسبی بررسی شده است. نشان داده‌شده است که با اعمال رویکرد کنترل توزیع شده، محاسبات کمتر و انعطاف‌پذیری بیشتر سیستم و همچنین عملکرد بهتری به ثبت رسیده است.

## پیوست

مشخصات پارامترهای استفاده‌شده برای شبیه‌سازی سناریوهای کنترلی متفاوت در نرم افزار Matlab در جدول پ-۱ ارائه شده است.

## مراجع

- [1] Z. Dong, X. Cong, Z. Xiao, X. Zheng, and N. Tai, "A study of hybrid energy storage system to suppress power fluctuations of pulse load in shipboard power system," in *Proc. Int. Conf. Smart Grids Energy Syst*, pp. 437-441, Perth, Australia, 23-26 Nov. 2020.
- [2] M. M. Mardani, M. H. Khooban, A. Masoudian, and T. Dragičević "Model predictive control of DC-DC converters to mitigate the

**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.

**محمدرضا 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 است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت، سیستم پالسی، شبکه‌های الکتریکی و کنترل می‌باشد.

**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.

- generation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 135, Article ID: 107484, Feb. 2022.
- [12] L. Xu, et al., "A review of DC shipboard microgrids - part II: control architectures, stability analysis, and protection schemes," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 4, pp. 4105-4120, Apr. 2022.
- [13] W. Zhu, J. Shi, and S. Abdelwahed, "End-to-end system level modeling and simulation for medium-voltage DC electric ship power systems," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 37-47, Jan. 2018.
- [14] R. Mo and H. Li, "Hybrid energy storage system with active filter function for shipboard MVDC system applications based on isolated modular multilevel DC/DC converter," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 1, pp. 79-87, Mar. 2017.
- [15] M. Stieneker and R. W. De Doncker, "Dual-active bridge DC-DC converter systems for medium-voltage DC distribution grids," *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electron. Conf. 1st South. Power Electron. Conf.*, 6 pp. Fortaleza, Brazil, 29 Nov.-2 Dec. 2015.
- [16] E. F. Camacho and C. B. Alba, *Model Predictive Control*, vol. 2, p. 79, Springer Science & Business Media, 2013, Citado, 2013.
- [17] M. Razzanelli, E. Crisostomi, L. Pallottino, and G. Pannocchia, "Distributed model predictive control for energy management in a network of microgrids using the dual decomposition method," *Optim. Control Appl. Methods*, vol. 41, no. 1, pp. 25-41, Jan. 2020.
- [18] D. Trentesaux, "Distributed control of production systems," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 22, no. 7, pp. 971-978, Oct. 2009.
- [19] L. Xu, et al., "Sliding mode control for pulsed load power supply converters in DC shipboard microgrids," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 151, Article ID: 109118, Sept. 2023.

**سعید نوایی** در سال ۱۳۹۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه بوعلی سینا و در سال ۱۴۰۳ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی مالک اشتر دریافت نمود. ایشان به مدت دو سال در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر مشغول به فعالیت بود و زمینه‌های علمی و کاری مورد علاقه ایشان عبارتند از: پیاده‌سازی سیستم‌های کنترلی در شبکه‌های قدرت، تحلیل و طراحی مدارات سوئیچینگ، طراحی بردهای الکترونیکی و انرژی‌های تجدیدپذیر.