

## مدیریت انرژی تولیدی یک سیستم رانش الکتریکی هیبریدی در یک شناور نمونه عملیاتی با هدف بهبود دنبال کردن بار

رضا مرادپور<sup>۱</sup>، محمد رسول جان نثار<sup>۲</sup> و نادر مرتضوی<sup>۳</sup>

mohammadrasol@gmail.com

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

۲- دانش‌آموخته دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد

۳- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد لاهیجان

### چکیده

امروزه سیستم‌های الکتریکی، با توجه به مزایای فراوان، برای استفاده در رانش و تولید توان شناورهای نمونه عملیاتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در سیستم‌های رانش الکتریکی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر که نقش به‌سزایی در کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی دارند، منابعی هم‌چون پیل سوختی، خازن و باتری مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدیریت توان تولیدی این منابع به‌منظور پاسخ مناسب به تغییرات بارهای رانشی و سایر بارهای مصرفی شناور، از جمله اقدامات مهم می‌باشد. در این مقاله با توجه به چگالی انرژی و توان این منابع و سرعت پاسخ آن‌ها، راه‌برد مدیریت انرژی بر این اساس استوار است که تغییرات سریع بارها توسط خازن و تولید پایدار انرژی توسط باتری و پیل سوختی انجام پذیرد. به این منظور یک سیستم الکتریکی شامل منابع، مبدل‌ها، بارهای رانشی واقعی و بار هتل برای یک شناور نمونه عملیاتی طراحی شده و با توجه به راه‌برد مدیریت انرژی معرفی شده، پاسخ سیستم به الگوهای مختلف تغییرات بار سنجیده شده است. نتایج نشان از کارآمد بودن سیستم الکتریکی و راه‌برد مدیریت انرژی معرفی شده دارد. همچنین در کنترل میزان شارژ باتری، روش ارائه شده در این مقاله بهتر از دو روشی که مقایسه با آن‌ها انجام شده عمل می‌کند.

واژگان کلیدی: سیستم‌های هیبریدی، رانش الکتریکی، شناور عملیاتی، مدیریت انرژی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۴/۱۱

## ۱- مقدمه

یک راهبرد مدیریت انرژی ساده اما مناسب را برای تقسیم توان بین منابع هیبریدی که شامل ژنراتور و ذخیره‌ساز (باتری یا خازن) می‌باشد، ارائه شده است. در این راهبرد اهدافی هم‌چون حداقل کردن سوخت مصرفی با در نظر گرفتن بار و دینامیک عناصر سیستم هیبریدی دنبال شده است.

با توجه به تغییرات ناگهانی بار و گشتاور کشتی که ناشی از حرکت چرخشی و امواج می‌باشد، در مرجع [۷] از یک سیستم هیبریدی و راهبرد مدیریت انرژی استفاده شده است. در این راهبرد تغییرات ناگهانی توان با استفاده از باتری و خازن پوشش داده شده است. در مرجع [۸] یک سیستم هیبریدی متشکل از یک دیزل ژنراتور سرعت متغیر (به‌عنوان منبع اصلی تأمین توان) و باتری و خازن برای غلبه بر تغییرات سریع بار، پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه تغییرات بار کشتی‌ها منجر به تغییرات ولتاژ، افزایش مصرف سوخت و افزایش آلاینده‌گی می‌شود، در مرجع [۹] از باتری به‌عنوان یک منبع ذخیره چگالی بالا انرژی و از ذخیره‌کننده مغناطیس ابررسانا<sup>۱</sup> به‌عنوان منبع چگالی بالا توان استفاده شده است. در مرجع [۱۰] یک سیستم توزیع DC با استفاده از باتری، برای کشتی پیشنهاد شده است که در آن برای مدیریت ولتاژ از کنترل دروپ بهره گرفته شده است. در مرجع [۱۱] به شرح مدیریت انرژی برای کاهش مصرف سوخت در خودروهایی هیبریدی، با استفاده از روش کنترل پیش‌بین پرداخته شده است. در مرجع [۱۱] تنها از باتری بهره گرفته شده و از پیل سوختی و ابرخازن استفاده نشده است.

در این مقاله و با در نظر گرفتن مقالات مرور شده، در ابتدا یک سیستم الکتریکی شامل پیل سوختی، باتری و ابرخازن به‌عنوان منابع تولید انرژی، بارهای رانشی و همچنین بار هتل، برای یک شناور نمونه عملیاتی طراحی شده است. همچنین مبدل‌های الکترونیک قدرت، متناسب با سطح توان تولیدی و مصرفی و همچنین اهداف مورد نظر به کار گرفته شده است. در ادامه با توجه به سناریوهای مختلف تعریف شده، راهبرد مناسب مدیریت انرژی منابع تولید توان، با هدف پاسخ مناسب به تغییرات توان معرفی شده است. فصل دوم به معرفی انواع سیستم‌های رانش و تولید توان برای شناورها می‌پردازد. در فصل سوم سیستم الکتریکی طراحی شده

امروزه با توجه به اهداف زیست‌محیطی، استفاده از سیستم رانش هیبریدی، با توجه بیش‌تری از سوی محققین همراه شده است. در تولید توان هیبریدی از عناصری هم‌چون باتری، پیل سوختی و ابرخازن استفاده می‌شود. مدیریت انرژی مناسب این تجهیزات برای افزایش کارایی و داشتن پاسخ مناسب به تغییرات توان رانشی و یا مصرفی امری ضروری می‌باشد. با توجه به تغییرات سریع بار کشتی که در اثر تغییرات جهت و برخورد با امواج دریا ایجاد می‌شود؛ مدیریت انرژی مناسب این تجهیزات، به‌گونه‌ای که تغییرات بار پوشش داده شود، حائز اهمیت است.

در مقالات بسیاری به موضوع مدیریت توان تولیدی سیستم‌های هیبریدی با اهداف مختلف پرداخته شده است. به‌عنوان نمونه در مرجع [۱] که از یک سیستم تولید انرژی هیبریدی شامل پیل سوختی و باتری بهره می‌برد، یک راهبرد مدیریت انرژی با هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی کشتی پیشنهاد شده است. در مرجع [۲] به این نکته اشاره شده است که استفاده از باتری در کنار پیل سوختی می‌تواند منجر به کاهش مصرف پیل سوختی شده و پاسخ دینامیکی سیستم رانش را بهبود ببخشد. در ادامه برای نشان دادن مزیت استفاده از این ترکیب یک راهبرد مدیریت انرژی برای بهبود تقسیم توان بین باتری و پیل سوختی ارائه شده است. در مرجع [۳] به این موضوع پرداخته شده است که بار رانشی یک کشتی الکتریکی به دلیل مواجهه با امواج و حرکت چرخشی پروانه با تغییرات زیادی همراه بوده و بر قابلیت اطمینان کشتی تأثیرگذار است. برای پاسخ مناسب به این تغییرات ناگهانی توان، یک مدل کنترل پیش‌بین معرفی شده است. در مرجع [۴] به این موضوع اشاره شده است که استفاده از فناوری‌های هیبریدی در کاهش سوخت مصرفی و آلاینده‌گی‌های زیست‌محیطی نقش دارد و به‌صورت موفقیت‌آمیز در کشتی‌های با نوع‌های متفاوت انجام شده است. در ادامه با استفاده از روش مدیریت انرژی، توان بهینه هر یک از منابع سیستم هیبریدی مشخص شده است. در مرجع [۵] مقایسه‌ای بین رانش الکتریکی، مکانیکی و هیبریدی بر اساس معیارهای هزینه، زیست‌محیطی و ریسک انجام شده و این نتیجه حاصل شده است که روش هیبریدی در مقایسه با دو روش دیگر اقتصادی‌تر است. در مرجع [۶]

<sup>1</sup> Super Magnetic Energy Storage (SMES)

- سیستم‌های قدرت DC به‌طور بالقوه تلفات تبدیل انرژی را کاهش می‌دهد. همچنین می‌تواند ژنراتور را با سرعت متغیر کنترل کند و مصرف سوخت و انتشار گازهای سمی را تا ۲۰ درصد کاهش دهد.

در این مقاله از روش رانش الکتریکی و تولید توان هیبریدی برای شناور نمونه استفاده شده است. منابع تولید توان در این مقاله شامل پیل سوختی، باتری و ابرخازن می‌باشد.

### ۳- سیستم هیبریدی تولید توان

اجزا سیستم هیبریدی شامل سیستم تولید انرژی با استفاده از ترکیب پیل سوختی، باتری و ابرخازن، سیستم مبدل‌ها، سیستم کنترلی و بارها شامل پمپ بالاست<sup>۱</sup>، موتور استیم تونل تراستر<sup>۲</sup>، موتور باو تونل تراستر<sup>۳</sup>، موتور باو تراستر<sup>۴</sup> و یک بار هتل، می‌باشد.

در این سیستم هیبریدی نیاز به یک سیستم کنترلی است تا میزان توان تولیدی را با توجه به تغییرات ناگهانی توان و مشخصه‌های هر یک از اجزای سیستم هیبریدی کنترل کند.

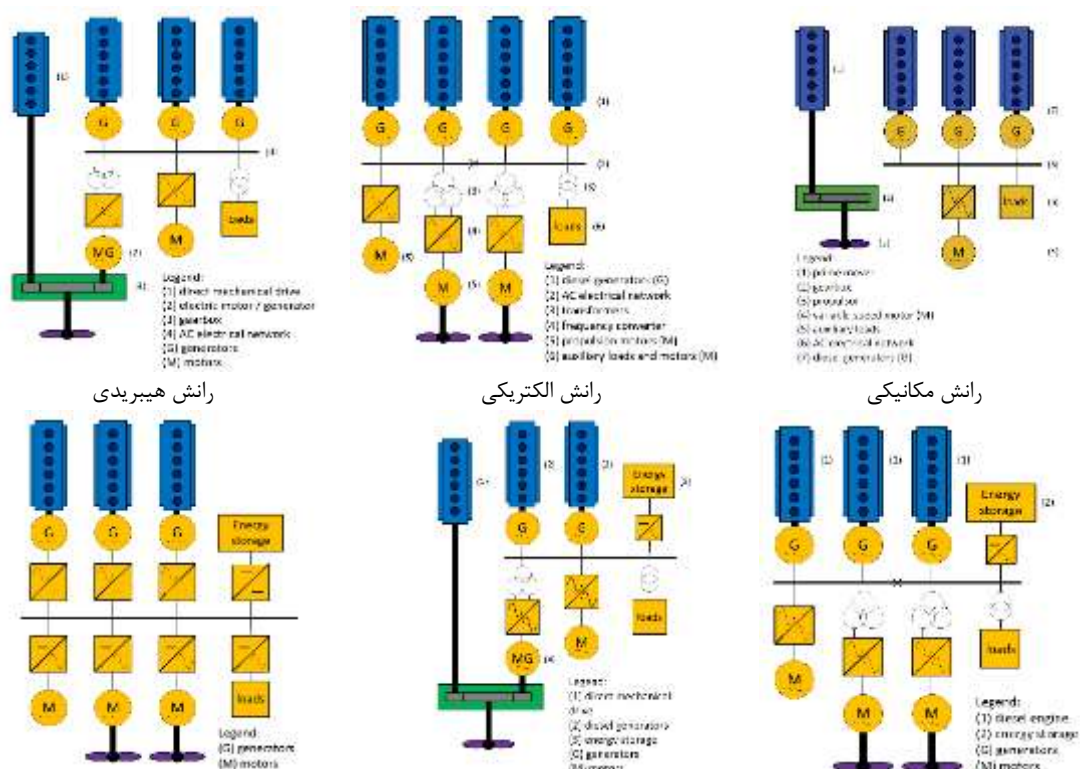
شامل منابع، مبدل‌های الکترونیک قدرت، ساختار کنترلی و بارها، معرفی شده است. در فصل چهارم با توجه به دو سناریو تعریف شده، پاسخ سیستم مدیریت انرژی به تغییرات توان بررسی می‌شود. فصل پنجم نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهادات اختصاص داده شده است.

### ۲- انواع سیستم‌های رانش و تولید توان شناورها

همه سیستم‌های رانش متشکل از سه بخش مولد نیروی محرکه، سیستم انتقال و پیش برنده (پروانه) می‌باشند. در شکل (۱) انواع روش‌های هیبریدی رانش و تولید توان مشاهده می‌شود [۱۲]. در ارتباط با روش‌های معرفی شده در شکل (۱) می‌توان به این موارد اشاره کرد.

- اگر کشتی زمان قابل توجهی را با سرعت کم‌تر از ۴۰ درصد نامی بپیماید نیروی هیبریدی اقتصادی‌تر است.

- منبع تغذیه هیبریدی زمانی مفید است که بار الکتریکی در طول زمان به‌طور مداوم نیاز باشد که منجر به بهبود دسترس‌پذیری و کاهش نویز می‌شود.



شکل (۱) انواع سیستم‌های رانش و تولید توان شناورها [۱۲].

<sup>3</sup> Bow Tunnel Thruster Motor  
<sup>4</sup> Bow Thrusters Motor

<sup>1</sup> Ballast Pump  
<sup>2</sup> Stem Tunnel Thruster Motor

### ۳-۱- پیل سوختی پلیمری<sup>۱</sup>

پیل سوختی پلیمری به دلیل دمای کاری پایین و سرعت بالای افزایش توان، رایج ترین نوع پیل سوختی است. برای شبیه سازی پیل سوختی از مدل نرم افزار متلب این عنصر استفاده شده است که در شکل (۲) آمده است. ولتاژ خروجی پیل سوختی ( $V$ ) با در نظر گرفتن واکنش های جنبشی ( $V_{act}$ ) (تلفات فعال سازی) و انتقال بار ( $V_r$ ) (تلفات مقاومتی و انتشار) با رابطه (۱) مدل می شود.

$$V = E_{oc} - V_{act} - V_r$$

$$V_{act} = A \ln \left( \frac{i_{fc}}{i_0} \right) \cdot \frac{1}{sT_d / 3 + 1} \quad (1)$$

$$V_r = r_{ohm} \cdot i_{fc}$$

که در آن  $E_{oc}$  ولتاژ ثابت پیل (بر حسب ولت)،  $A$  شیب تافل<sup>۲</sup> (بر حسب ولت)،  $i_0$  جریان تبادل شده (بر حسب آمپر)،  $r_{ohm}$  ترکیب مقاومت پیل و انتشار (بر حسب اهم)،  $i_{fc}$  جریان خروجی پیل (بر حسب آمپر) و  $T_d$  زمان استقرار پیل به یک پله جریان است [۱۳].

### ۳-۲- باتری سرب اسید

باتری مورد استفاده در این مقاله از نوع باتری سرب اسید است که با توجه به قیمت و مشخصات مناسب آن انتخاب شده است. به منظور مدل سازی باتری همانند پیل سوختی از مدل نرم افزار متلب استفاده شده است که شمای آن در شکل (۳) نمایش داده شده است.

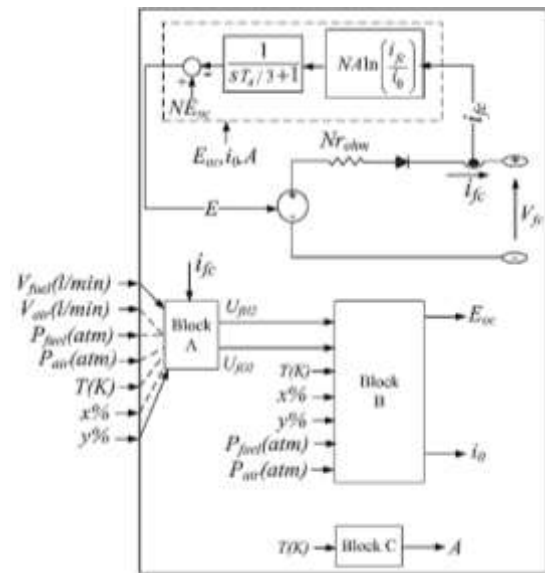
ولتاژ باتری با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} - R_b \cdot I$$

$$+ A_b \exp(-B \cdot it) - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* \quad (2)$$

که در آن  $E_0$  ولتاژ ثابت باتری (بر حسب ولت)،  $K$  ثابت قطبش (بر حسب ولت بر آمپرساعت)،  $Q$  ظرفیت باتری (بر حسب آمپرساعت)،  $i^*$  جریان فیلتر شده باتری (بر حسب آمپر)،  $it$  جریان واقعی شارژ باتری (بر حسب آمپرساعت)،  $A_b$  دامنه ناحیه نمایی (بر حسب ولت)،  $B$  معکوس ثابت ناحیه زمانی نمایی (بر حسب معکوس آمپرساعت)،  $R_b$  مقاومت داخلی باتری (بر حسب اهم) و  $I$  جریان واقعی خروجی باتری (بر حسب آمپر) می باشد.

به عنوان نمونه در لحظه تغییرات سریع توان تولید انرژی به وسیله ابرخازن انجام می شود. همچنین پیل سوختی و باتری باید به گونه ای کنترل شوند که توانایی تأمین انرژی حالت دائم را داشته باشند. اجزا سیستم هیبریدی طراحی شده به شرح جدول (۱) است. در ادامه هر یک از اجزا سیستم هیبریدی با جزئیات بیشتر شرح داده شده اند.



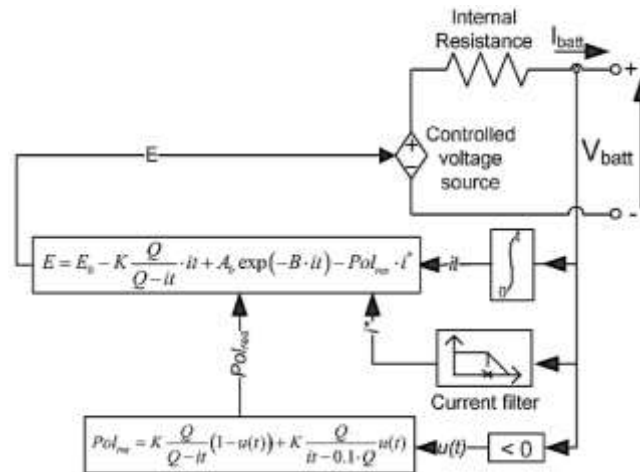
شکل (۲) مدل پیل سوختی [۱۳].

جدول (۱) سیستم هیبریدی طراحی شده.

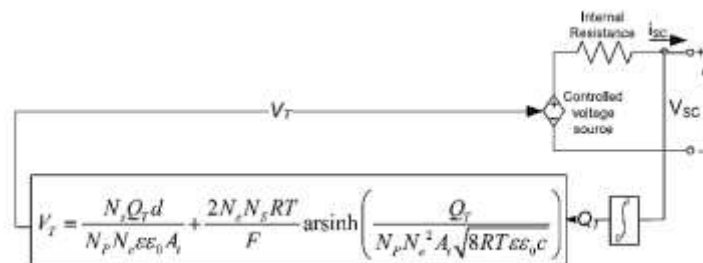
از نوع پلیمری دارای توان بیشینه $12/5 \text{ kW}$ ، توان نامی $10 \text{ kW}$ ، ولتاژ $V (30-60)$	پیل سوختی
از نوع سرب اسید دارای ولتاژ $48 \text{ V}$ و $40 \text{ Ah}$	باتری
دارای ولتاژ $291/6 \text{ V}$ و ظرفیت $15/6 \text{ F}$	ابرخازن
دارای توان $12/5 \text{ kW}$ با قابلیت تنظیم ولتاژ خروجی و محدودیت جریان ورودی	مبدل بوست پیل سوختی
مبدل بوست $4 \text{ kW}$ برای حالت دشارژ و باک باتری $1/2 \text{ kW}$ برای شارژ باتری	مبدل باک و بوست باتری
دارای توان $30 \text{ kVA}$ ورودی $207 \text{ V DC}$ و خروجی $400 \text{ V AC}$ و فرکانس $50 \text{ Hz}$	اینورتر
دارای توان $0/75 \text{ kVA}$ و ولتاژ $400 \text{ V}$	پمپ بالاست
دارای توان $0/75 \text{ kVA}$ و ولتاژ $400 \text{ V}$	موتور استیم تونل تراستر
دارای توان $1/5 \text{ kVA}$ و ولتاژ $400 \text{ V}$	موتور باو تونل تراستر
دارای توان $3 \text{ kVA}$ و ولتاژ $400 \text{ V}$	موتور باو تراستر
دارای توان $3 \text{ kW}$ و ولتاژ $400 \text{ V}$	بار هتل

<sup>2</sup> Tafel

<sup>1</sup> Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)



شکل (۳) مدل باتری سرب اسید [۱۳].



شکل (۴) مدل ابرخازن [۱۳].

الکترولیت و خلأ (بر حسب فاراد بر متر) است.  $A_i$  سطح مقطع بین الکتروود و الکترولیت (بر حسب مترمربع)،  $d$  طول لایه هلمهولتز یا شعاع مولکولی (بر حسب متر)،  $F$  ثابت فارادی،  $R$  ثابت عمومی گازها،  $T$  دمای کاری (بر حسب درجه کلون)،  $Q_c$  شارژ الکتریکی سلول (بر حسب کولن) و  $c$  غلظت مولار (بر حسب مول بر مترمکعب) می باشد. ولتاژ خروجی ابرخازن با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می شود.

$$V_{sc} = \frac{Q_T}{C_T} - R_{sc} \cdot i_{sc} \quad (4)$$

$$Q_T = N_p Q_c = \int i_{sc} dt$$

که در آن  $Q_T$  و  $C_T$  به ترتیب شارژ الکتریکی کل (بر حسب کولن) و ظرفیت کل (بر حسب فاراد)،  $R_{sc}$  مقاومت ابرخازن (بر حسب اهم)،  $N_p$  تعداد سلول های موازی و  $i_{sc}$  جریان ابرخازن (بر حسب آمپر) می باشد [۱۳].

### ۳-۴- مبدل DC-DC

پیل سوختی و باتری به مبدل DC-DC متصل شده اند که

مقدار  $K(Q/(Q-it))$  ولتاژ پلاریزاسیون و  $K(Q/(Q-it))it$  مقاومت پلاریزاسیون است [۱۳].

### ۳-۳- ابرخازن

ابرخازن شبیه خازن های مرسوم الکترواستاتیکی و الکترولیتی است با این مزیت که می تواند انرژی بالایی را ذخیره و یا دشارژ کند. مدل ابرخازن بر اساس نرم افزار متلب استخراج شده و در شکل (۴) نمایش داده شده است. ظرفیت ابرخازن ( $C$ ) با رابطه (۳) محاسبه می شود.

$$C = \left[ \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{GC}} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$C_H = \frac{N_e \epsilon \epsilon_0 A_i}{d}$$

$$C_{GC} = \frac{F Q_c}{2 N_e RT} \sinh\left(\frac{Q_c}{N_e^2 A_i \sqrt{8 RT \epsilon \epsilon_0 c}}\right)$$

که در آن  $C_H$  و  $C_{GC}$  به ترتیب ظرفیت خازن هلمهولتز<sup>۱</sup> و گوی-چاپمن<sup>۲</sup> (بر حسب فاراد) است.  $N_e$  تعداد لایه های الکتروود و  $\epsilon$  و  $\epsilon_0$  به ترتیب ضریب نفوذ پذیری نسبی در محیط

<sup>2</sup> Gouy-Chapman

<sup>1</sup> Helmholtz

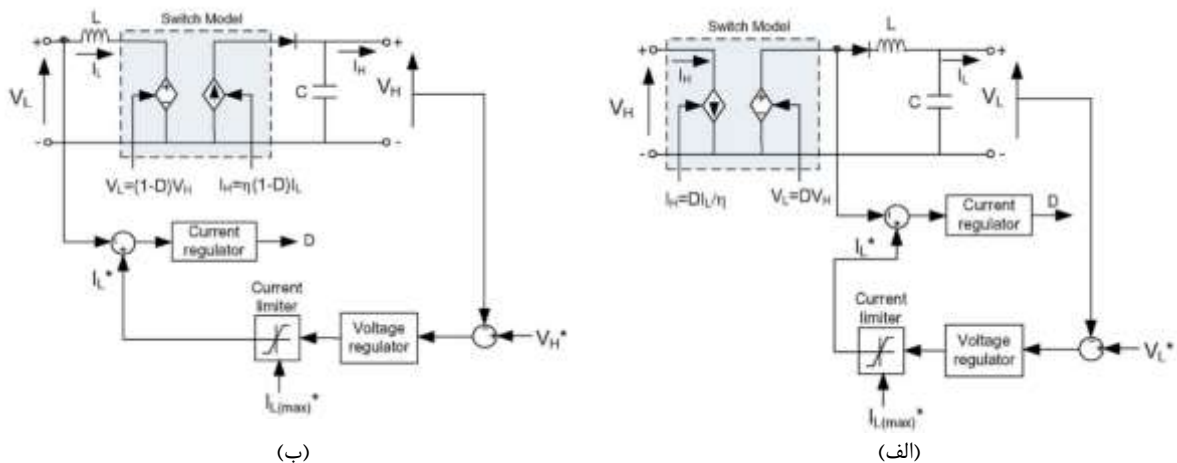
۳-۵- مبدل DC-AC (اینورتر)

همانند مبدل DC-DC، اینورتر هم بر اساس روش مقدار متوسط مدل سازی شده است. اینورتر استفاده شده در این مقاله در شکل (۶) نمایش داده شده است و خروجی آن دارای ولتاژ خط ۴۰۰V و فرکانس ۵۰Hz است [۱۳].

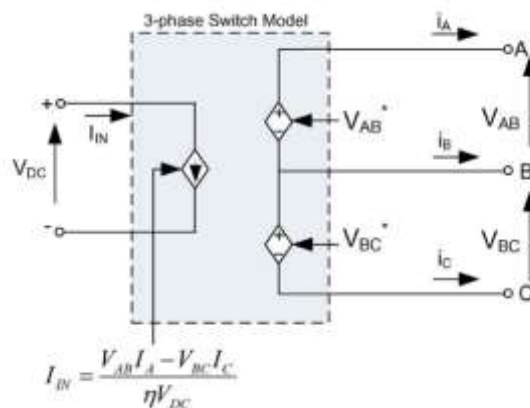
۳-۶- روش کنترلی

روش کنترلی استفاده شده در این مقاله، با استفاده از کنترل کننده تناسبی انتگرالی<sup>۲</sup> است (شکل (۷)) [۱۴]. ورودی کنترل کننده تناسبی انتگرالی میزان شارژ<sup>۳</sup> باتری و خروجی آن توان باتری است که از مقدار بار کاسته می شود تا مقدار توان مرجع پیل سوختی حاصل شود. در منطق کنترلی اگر میزان شارژ باتری از مقدار مرجع بیشتر بود و مقدار توان پیل سوختی هم کم بود، باتری تمام بار را تأمین کند.

قابلیت تغییر ولتاژ DC خروجی آن ها را به همراه دارد. مبدل های DC-DC را می توان به دو صورت سوئیچینگ و مقدار متوسط مدل سازی کرد. مدل سازی سوئیچینگ برای اهداف طراحی و کاربرد در روش مدولاسیون پهنای پالس<sup>۱</sup> می باشد؛ در حالی که از هارمونیک و تلفات سوئیچینگ در این روش صرف نظر می شود. این مدل نیاز به زمان نمونه برداری خیلی پایین برای انجام عملیات سوئیچینگ است که منجر به طولانی شدن زمان شبیه سازی می شود. در مقابل روش مقدار متوسط دارای زمان کم تر شبیه سازی است که به دلیل مدل سازی سوئیچ ها با منابع ولتاژ و جریان کنترل شده می باشد. در این مدل هم هارمونیک سوئیچینگ لحاظ نمی شود؛ اما به دلیل در نظر گرفتن حالات دینامیکی سوئیچ ها زمان نمونه برداری قابل افزایش است. در این مقاله از روش مقدار متوسط استفاده شده است که مدل آن در شکل (۵) نمایش داده شده است [۱۳].



شکل (۵) مدل مبدل DC-DC (الف) باک (ب) بوست [۱۳]



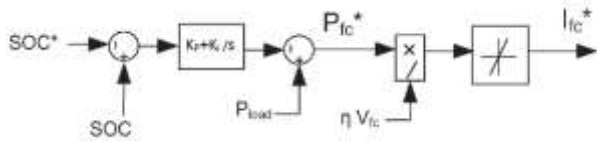
شکل (۶) مدل اینورتر [۱۳].

<sup>3</sup> State of Charge (SOC)

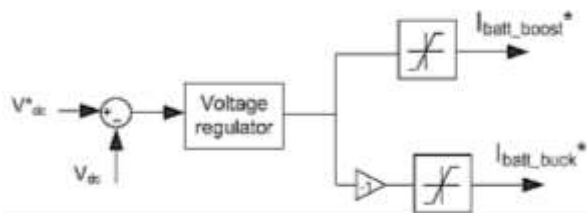
<sup>1</sup> Pulse Width Modulation (PWM)

<sup>2</sup> Proportional Integral (PI)

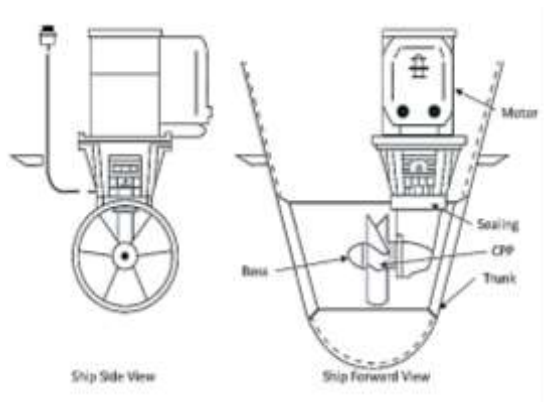
آب‌های کم عمق می‌شود، برای سهولت در انتقال مقدار زیاد آب به مخزن بالاست و یا تخلیه آن کاربرد دارد [۱۶]. در شکل (۱۰) ساختار شناور طراحی شده آمده است.



شکل (۷) بلوک دیاگرام کنترلی جریان پیل سوختی [۱۴].



شکل (۸) بلوک دیاگرام کنترلی جریان باتری [۱۳].



شکل (۹) موتور باو تراستر [۱۵].

در مقابل زمانی که میزان شارژ باتری از مقدار مرجع کم‌تر بود، پیل سوختی تقریباً بار را تأمین کند. در این مقاله، مقادیر ضریب  $K_P$  و  $K_I$  کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی برابر با ۵۰۰ و ۵۰۰۰ تنظیم شده‌اند.

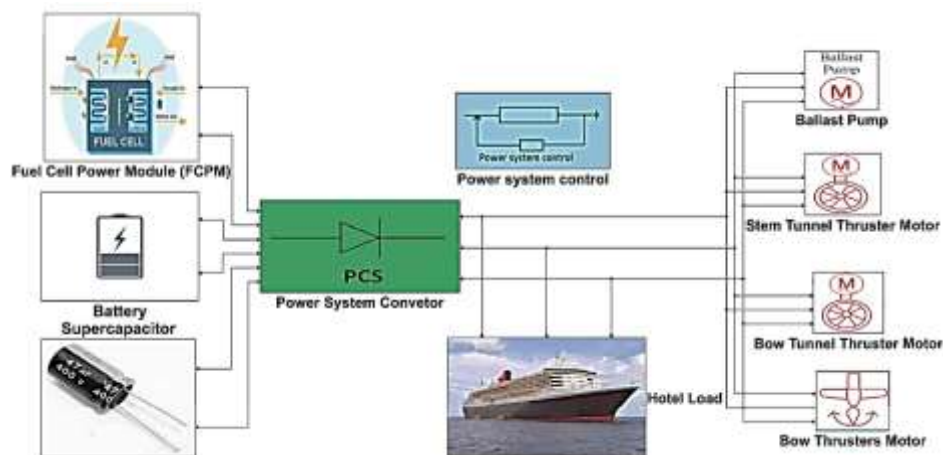
کنترل ولتاژ باس DC هم به‌وسیله مبدل DC-DC باتری انجام می‌شود که بلوک دیاگرام کنترلی آن در شکل (۸) نشان داده شده است که با توجه به ولتاژ باتری یکی از حالت‌های شارژ و یا دشارژ انتخاب می‌شود [۱۳].

### ۷-۳- موتور باو تراستر

این موتور یک نوع موتور پروانه‌ای است که در خمیدگی<sup>۱</sup> (قسمت جلو) و قسمت عقب<sup>۲</sup> کشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اندازه آن از پروانه کشتی کوچک‌تر است و به مانور پذیری کشتی در سرعت‌های پایین‌تر کمک می‌کند. این موتور برای مانور دادن کشتی در نزدیک آب‌های ساحلی، کانال‌ها و یا هنگام ورود و خروج از بندر در زمان‌های مواجهه با جریان‌های آب و هوایی نامناسب و یا جریان مخالف باد استفاده می‌شود. در شکل (۹) ساختار این نوع موتور نشان داده شده است [۱۵].

### ۸-۳- پمپ بالاست

این نوع پمپ به منظور حفظ تعادل و پایداری کشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کشتی‌های قدیمی‌تر از سنگ یا آهن برای این منظور استفاده می‌کردند؛ اما در حال حاضر این کار با آب دریا انجام می‌شود که به راحتی قابل تنظیم و در دسترس می‌باشد. این نوع پمپ در مواقعی که کشتی وارد



شکل (۱۰) شمایی از سیستم طراحی شده شناور.

<sup>2</sup> Stern

<sup>1</sup> Bow

#### ۴- نتایج

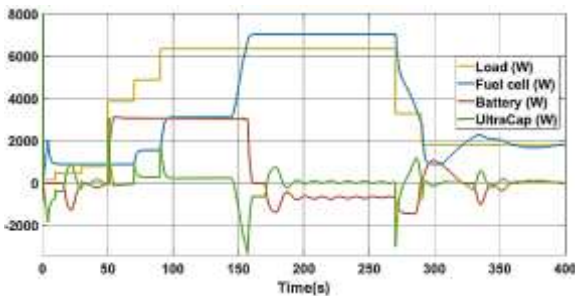
به منظور بررسی عملکرد سیستم طراحی شده، دو سناریو مختلف برای ورود بارها در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۱- سناریو اول

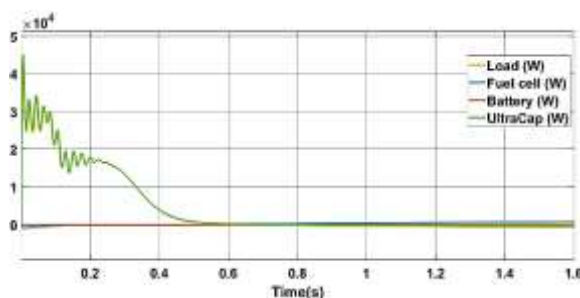
در سناریو اول بارها به صورت جدول (۲) به شبکه وارد و یا از آن خارج می‌شوند.

جدول (۲) ترتیب ورود و خروج بارها در سناریو اول.

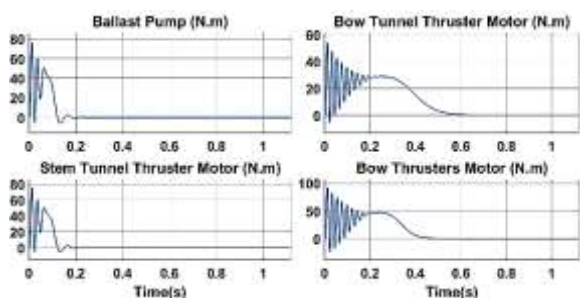
ورود در ثانیه ۱۰	پمپ بالاست
ورود در ثانیه ۳۰	موتور استیم تونل تراستر
ورود در ثانیه ۵۰ - خروج در ثانیه ۲۷۰	بار هتل
ورود در ثانیه ۷۰	موتور باو تونل تراستر
ورود در ثانیه ۹۰ - خروج در ثانیه ۲۹۰	موتور باو تراستر



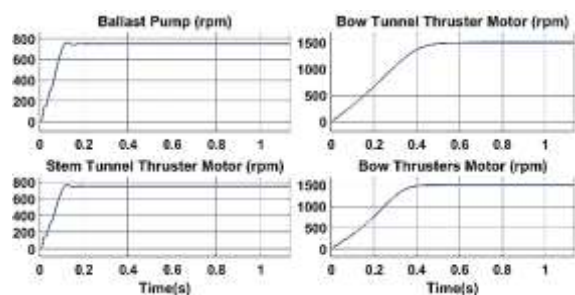
شکل (۱۱) توان تولیدی منابع.



شکل (۱۲) توان تولیدی منابع در لحظات ابتدایی.



شکل (۱۳) گشتاور الکتریکی در لحظات ابتدایی.



شکل (۱۴) سرعت‌های موتورهای الکتریکی در لحظات ابتدایی.

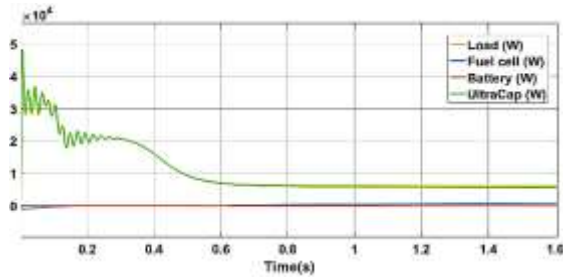
تمام بارهای موتوری در ابتدا بدون بار به راه افتاده و در ثانیه‌های مذکور گشتاور مکانیکی به آن‌ها اعمال می‌شود.

در شکل (۱۱) توان تولید شده توسط پیل سوختی، باتری و ابرخازن نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمان‌های ورود و خروج بارها، با توجه به سیستم کنترلی این مقاله، در ابتدا توان مورد نیاز، توسط ابرخازن تولید و یا صرف شارژ شدن آن می‌شود. در ادامه باتری بخش از توان را تولید می‌کند و پیل سوختی وظیفه تأمین دائمی انرژی را به عهده دارد. همچنین بخشی از توان باتری و پیل سوختی به شارژ ابرخازن اختصاص می‌یابد. با توجه به اینکه در انتها تعدادی از بارها در مدار باقی می‌ماند، مجموع توان پیل سوختی، باتری و ابرخازن باید برابر با بار کل باقیمانده در سیستم باشد.

به منظور بررسی توان تولیدی در لحظات ابتدایی، در شکل (۱۲) این زمان با وضوح بیشتری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این لحظات ابرخازن توان مورد نیاز را تولید می‌کند. با توجه به جدول (۲)، بار اول در زمان ۱۰ ثانیه اعمال می‌شود. در زمان‌های قبل از نیم ثانیه به دلیل گشتاور راه‌اندازی بی‌باری موتورها، توان زیادی از سیستم کشیده می‌شود که با راه‌اندازی آن‌ها این توان کم می‌شود.

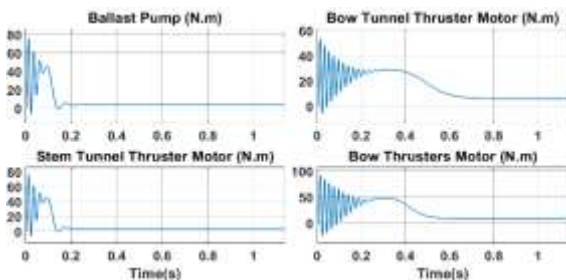
در شکل (۱۳) گشتاور الکتریکی موتورهای الکتریکی در لحظات ابتدایی نشان داده شده است. در شکل (۱۴) سرعت موتورهای الکتریکی به کار برده شده، در لحظات ابتدایی



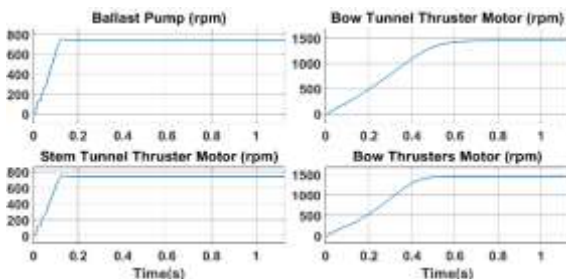


شکل (۱۷) توان تولیدی منابع در لحظات ابتدایی

در شکل (۱۸) گشتاور الکتریکی موتورهای الکتریکی در لحظات ابتدایی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود بر خلاف سناریو اول که بعد از گذشت حالت گذرا، میزان گشتاور الکتریکی صفر می شود، در اینجا به دلیل اعمال همه بارها در لحظه صفر میزان گشتاور الکتریکی بعد از گذشت حالت گذرا، صفر نمی شود و برای هر موتور به میزان گشتاور مکانیکی اعمالی به آن می باشد. در شکل (۱۹) سرعت موتورهای الکتریکی به کار برده شده، در لحظات ابتدایی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود سرعت موتورها بعد از گذشت زمان نسبتاً کمی به حالت پایدار می رسد، هرچند که این زمان برای هر موتور نسبت به سناریو اول بیشتر می باشد که به دلیل اعمال همزمان تمام بارها به مدار در لحظه صفر می باشد. در شکل (۲۰) میزان شارژ باتری و ولتاژ باس DC نمایش داده شده است.



شکل (۱۸) گشتاور الکتریکی در لحظات ابتدایی.

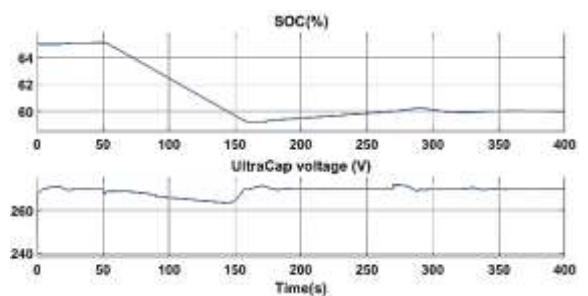


شکل (۱۹) سرعت های موتورهای الکتریکی در لحظات ابتدایی.

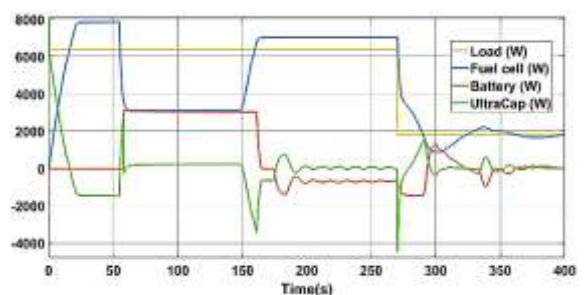
در شکل (۱۵) میزان شارژ باتری و ولتاژ باس DC آمده است. همان طور که مشاهده می شود میزان شارژ باتری و ولتاژ باس DC اینورتر در بازه قابل قبولی کنترل شده اند.

#### ۴-۲- سناریو دوم

در این سناریو تمام بارها در لحظه صفر به مدار وارد شده، بارهای هتل و موتور باو تراستر در ثانیه ۲۷۰ از مدار خارج شده و عملکرد سیستم کنترلی مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل (۱۶) توان تولید شده توسط پیل سوختی، باتری و ابرخازن نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در لحظه صفر بار نامی به مدار اعمال می شود. در لحظات ابتدایی ابرخازن مقدار توان مورد نیاز را تأمین می کند. در ادامه تولید توان به وسیله پیل سوختی انجام می شود. در ثانیه ۶۰ مقدار تولید پیل سوختی کاهش یافته و بخشی از توان به وسیله باتری تأمین می شود. پس از این مدت زمان، توان باتری کم شده و توان تولیدی پیل سوختی افزایش می یابد. در لحظه خروج همزمان دو بار، ابرخازن شارژ شده و در ادامه توان تولیدی ابرخازن و باتری کاهش یافته و بار دائمی توسط پیل سوختی تأمین می شود. به منظور بررسی توان تولیدی در لحظات ابتدایی، در شکل (۱۷) این زمان با وضوح بیشتری نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در این لحظات ابرخازن توان مورد نیاز را تولید می کند.



شکل (۱۵) میزان شارژ باتری و ولتاژ باس DC



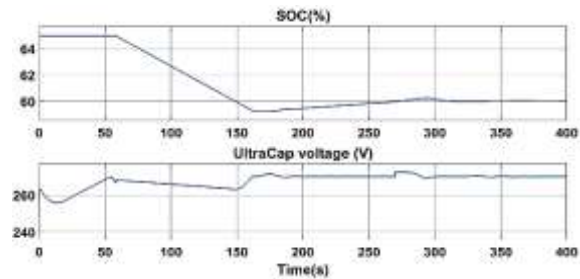
شکل (۱۶) توان تولیدی منابع.

این عنصر شارژ شود. در ادامه و با گذشت زمان و رسیدن به حالت پایدار، انرژی مورد نیاز توسط باتری و پیل سوختی تأمین شد. همچنین به منظور شارژ شدن و آماده بودن باتری و ابرخازن برای تغییرات توان احتمالی، مقداری از انرژی تولید پیل سوختی به این امر اختصاص یافت.

نتایج نشان داد در دو سناریو معرفی شده و به خصوص در سناریو دوم که تمام بارها در لحظه صفر به مدار وارد شدند و در ادامه دو بار بزرگ در یک لحظه از مدار خارج شدند، سیستم الکتریکی طراحی شده شامل اندازه پیل سوختی، باتری و ابرخازن، سیستم‌های مبدل الکترونیک قدرت و سیستم مدیریت انرژی، توانایی تأمین بار در بحرانی‌ترین شرایط را دارا هستند. به عنوان یک شاخص قابل اندازه‌گیری مشاهده شد، روش ارائه شده در این مقاله در کنترل میزان شارژ باتری بهتر عمل می‌کند. به منظور ادامه کار برای تحقیقات آینده، مدل‌سازی و شبیه‌سازی سلف‌های ابرسانا در کنار منابع تولید انرژی به کار گرفته شده در این مقاله، با توجه به خصوصیات سلف‌های ابرسانا، می‌تواند منجر به نتایج بهتری شود.

#### ۶- مراجع

- [1] Bassam, A. M., Phillips, A. B., Turnock, S.R., and Wilson P.A., "Development of a Multi-Scheme Energy Management Strategy for a Hybrid Fuel Cell Driven Passenger Ship", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.42, No.1, pp.623-635, 2017.
- [2] Bassam, A.M., Phillips A.B., Turnock S.R., and Wilson P.A., "An Improved Energy Management Strategy for a Hybrid Fuel Cell/Battery Passenger Vessel", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.41, No.47, pp.22453-22464, 2016.
- [3] Hou, J., Sun, J., and Hofmann, H., "Adaptive Model Predictive Control with Propulsion Load Estimation and Prediction for All-Electric Ship Energy Management", Energy, Vol.150, pp.877-889, 2018.
- [4] Kalikatzarakis, M., Geertsma, R.D., Boonen, E.J., K. Visser, and R.R. Negenborn, "Ship Energy Management for Hybrid Propulsion and Power Supply with Shore Charging", Control Engineering Practice, Vol.76, pp.133-154, 2018.
- [5] Jeong B., Oguz E., Wang H., and Zhou P., "Multi-Criteria Decision-Making for Marine Propulsion: Hybrid, Diesel Electric and Diesel Mechanical Systems from Cost-Environment-Risk Perspectives", Applied Energy, Vol.230, pp.1065-1081, 2018.



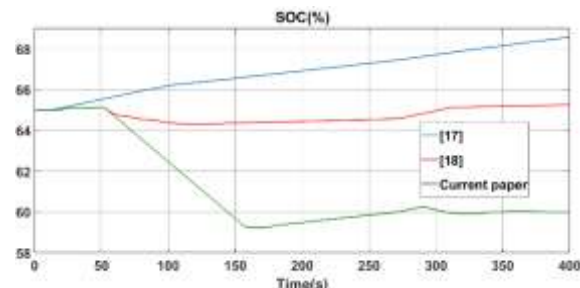
شکل (۲۰) میزان شارژ باتری و ولتاژ باس DC

همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان شارژ باتری و ولتاژ باس DC اینورتر در بازه قابل قبولی کنترل شده‌اند.

#### ۳-۴- مقایسه با روش‌های دیگر

روش مقاله حاضر با دو روش راهبرد کمینه کردن مصرف سوخت معادل [۱۷] و ترکیب جداسازی فرکانس با روش منطق فازی [۱۸] مقایسه شده است. در شکل (۲۱) به عنوان یک شاخص قابل اندازه‌گیری، میزان شارژ باتری در سناریو اول، با توجه به روش‌های مختلف کنترلی نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در روش مورد استفاده در مقاله حاضر، میزان شارژ باتری در رسیدن به هدف که مقدار ۶۰ درصد است بهتر عمل می‌کند. روش‌های ارائه شده در مرجع [۱۷] و [۱۸] در رسیدن به میزان شارژ باتری ۶۰ درصد، به ترتیب حدود ۵ درصد و ۹ درصد خطا دارند.



شکل (۲۱) مقایسه روش‌های مختلف

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدیریت انرژی پیل سوختی، باتری و ابرخازن برای دستیابی به پاسخ مناسب جهت تأمین بارهای رانشی واقعی و هتل در یک شناور نمونه عملیاتی انجام گرفت. ساختار مدیریت انرژی معرفی شده به این صورت بود که در لحظات ابتدایی تغییرات بار، با توجه به پاسخ سریع ابرخازن، انرژی مورد نیاز توسط این عنصر تولید و یا انرژی اضافی در

Dusmez, S., "Fuel Cell and Ultra-Capacitor Hybridization: A Prototype Test Bench based Analysis of Different Energy Management Strategies for Vehicular Applications", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.35, No.20, pp.11161-11171, 2010.

- [6] Dinh, T.Q., Bui, T. M. N., Marco, J., Watts, C., and Yoon, J. I., "Optimal Energy Management for Hybrid Electric Dynamic Positioning Vessels", IFAC-PapersOnLine, Vol.51, No.29, pp.98-103, 2018.
- [7] Hou, J., Sun, J., and Hofmann, H.F., "Mitigating Power Fluctuations in Electric Ship Propulsion With Hybrid Energy Storage System: Design and Analysis", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.43, No.1, pp.93-107, 2018.
- [8] Bellache, K., Camara, M. B., and Dakyo, B., "Transient Power Control for Diesel-Generator Assistance in Electric Boat Applications Using Supercapacitors and Batteries", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol.6, No.1, pp.416-428, 2018.
- [9] H. Alafnan, "Stability Improvement of DC Power Systems in an All-Electric Ship Using Hybrid SMES/Battery", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.28, No.3, pp.1-6, 2018.
- [10] Jin, Z., Meng, L., Guerrero, J.M., and Han, R., "Hierarchical Control Design for a Shipboard Power System With DC Distribution and Energy Storage Aboard Future More-Electric Ships", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.14, No.2, pp.703-714, 2018.
- [۱۱] سامیه نجاران، زهرا رحمانی، مجتبی حسن زاده. "مدیریت انرژی برای کاهش مصرف سوخت در خودروهای هیبرید الکتریکی پلاگین موازی مبتنی بر کنترل پیش‌بین فازی"، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۷، شماره ۵، صفحات ۳۵۳-۳۶۲، ۱۳۹۶.
- [12] Geertsma, R.D., Negenborn, R.R., Visser, K., and Hopman J.J., "Design and Control of Hybrid Power and Propulsion Systems for Smart Ships: A Review of Developments", Applied Energy, Vol.194, pp.30-54, 2017.
- [13] Motapon S.N., Dessaint, L., and Al-Haddad, K., "A Comparative Study of Energy Management Schemes for a Fuel-Cell Hybrid Emergency Power System of More-Electric Aircraft", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.61, No.3, pp.1320-1334, 2014.
- [14] Thounthong, P. and Rael, S., "The Benefits of Hybridization", IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol.3, No.3, pp.25-37, 2009.
- [15] "Bow Thrusters: Construction and Working," [Online].<https://www.marineinsight.com/tech/bow-thrusters-construction-and-working/amp/>.
- [16] "castle pumps," [Online] <https://www.Castlepumps.com/pump-application/ballast-pumps>.
- [17] Garcia, P., Torreglosa, J.P., Fernandez L.M., and Jurado, F., "Viability Study of a FC-battery-SC Tramway Controlled by Equivalent Consumption Minimization Strategy", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.37, No.11, pp.9368-9382, 2012.
- [18] Vural, B., Boynuegri, A.R., Nakir, I., Erdinc, O., Balikci, A., Uzunoglu, M., Gorgun, H., and