

## التحديات والمقترحات بخصوص تحديد عدد وقدرة المولدات الكهربائية في السفن

### ذات الدفع الكهربائي مقارنة مع السفن ذات الدفع التقليدي.

منصور سالم حشاد<sup>1\*</sup>، كلثوم محمد أبوراس<sup>2</sup>، ريم غيث ابوزويتة<sup>3</sup>

<sup>1</sup> قسم التقنيات الكهربائية والالكترونية، المعهد العالي للتقنيات الهندسية، طرابلس، ليبيا.

<sup>2</sup> قسم المواد العامة، الكلية التقنية الهندسية جنزور، طرابلس، ليبيا.

<sup>2</sup> قسم المواد العامة، المعهد العالي للتقنيات الهندسية، طرابلس، ليبيا.

\* البريد الإلكتروني (للباحث المرجعي): [ms\\_hashad@hotmail.com](mailto:ms_hashad@hotmail.com)<sup>1</sup>

[kwkakwka36@gmail.com](mailto:kwkakwka36@gmail.com)<sup>2</sup> [r.abouzweetah@hiett.edu.ly](mailto:r.abouzweetah@hiett.edu.ly)<sup>3</sup>

### المخلص

في هذه الورقة البحثية تمت مناقشة الابعاد التصميمية في اختيار عدد المولدات والقدرة الاسمية لكل مولد، والقدرة الإجمالية لمحطة التوليد؛ وهي المجموع الكلي لقدرة جميع المولدات إلا واحد. يعتبر اختيار العدد الأمثل تحدياً كبيراً ومهماً من الناحية التصميمية والعملية والمعرفية، ويجب أن يوازن بين تلبية الحاجة للقدرة الكهربائية في حدها الأقصى وبين التحميل الأمثل من ناحية الاستهلاك النوعي للوقود في حدها الأدنى. نظراً لأن بعض الحمولات على السفينة البحرية قد تتغير بشكل عشوائي والأخرى بشكل اضطراري فإن هذا الموضوع يدخل تحت حساب الاحتمالات الرياضية لتعيين المشاركة الزمنية بين الأحمال بغرض تعيين القيمتين القصوى والأدنى. عدم تعيين القيمة القصوى بشكل جيد سيسبب في عجز عن امداد الطاقة بالشكل المطلوب وبالتالي سينعكس سلباً على الوظيفية للقطعة البحرية، وتحقيق مهامها المرجوة منها، وخصوصاً في الحالات الحرجة والتي قد تؤثر سلباً على السلامة البحرية. عدم تعيين القيمة الأدنى للقدرة المطلوبة سيكون له أثر على الاستهلاك النوعي للوقود وبالتالي فله جانب اقتصادي يضر بالتنافس في السوق العالمي نظراً لزيادة الكلفة التشغيلية، أيضاً له علاقة في زيادة وثيرة الأعطال بمحركات الديزل الدافعة للمولد. نظراً للتطور التقني الحادث في منظومات الدفع فإن حيثيات وقواعد التصميم قد تختلف بشكل كبير عليه وجب وضع مقارنة بين الحالتين (سفينة دفع تقليدي، وسفينة بدفع كهربائي). بعض المعضلات التي قد تواجه المصمم في سفن الدفع التقليدي تختفي تماماً في الدفع الكهربائي ليحل محلها معضلات من نوع اخر؛ مثلاً في نطاق ظهور التوافقيات العليا (بمفهوم فورييه) وكذلك مشاكل مرتبطة مع التوافق الكهرومغناطيسي. لهذا الغرض تم عمل تشبيه حاسوبي في برنامج الماتلاب مع وضع حلول عملية توضح إمكانية اجتياز هذه المشاكل في الشبكات الحديثة.

**الكلمات المفتاحية** — منظومات الدفع الكهربائية، منظومات القوى، العواكس الجهدية، المرشحات الفعالة، عدد وقدرة المولدات.

**Abstract:**

In this research paper, the design dimensions for selecting the number of generators, the nominal capacity of each generator, and the total capacity of the power plant—which is the total capacity of all generators except one—are discussed. Choosing the optimal number poses a significant challenge in terms of design, practicality, and knowledge. It must balance between meeting the maximum electrical power demand and achieving optimal load in terms of specific fuel consumption.

Given that some loads on the marine vessel may change randomly and others out of necessity, this topic falls under mathematical probability calculations to determine the temporal sharing among loads to identify the maximum and minimum values. Failing to properly determine the maximum value will result in an inability to supply the required power, negatively affecting the vessel's functionality and its intended tasks, especially in critical situations that may impact maritime safety. On the other hand, failing to determine the minimum required power will impact specific fuel consumption, thereby having an economic burden that hinders global market competitiveness due to increased operational costs. Additionally, it relates to increased failure rates in diesel engines driving the generator. Given the technological advancements in propulsion systems, the design considerations and rules may differ significantly, necessitating a comparison between traditional and electric propulsion vessels. Some challenges faced by designers in traditional propulsion vessels disappear entirely in electric propulsion but are replaced by other challenges such as the emergence of higher harmonics (in the Fourier sense) and issues related to electromagnetic compatibility. For this purpose, a computational simulation in Matlab was conducted, presenting practical solutions to demonstrate the feasibility of overcoming these issues in modern networks.

**المقدمة**

نظام الطاقة الكهربائية في السفن يُعدّ عنصرًا حيويًا لتشغيل مختلف الأجهزة والمعدات التي تضمن أداءً فعالاً وآمناً خلال الرحلات البحرية. تتمثل أهمية هذا النظام في قدرته على توفير الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل المحركات الرئيسية، الأنظمة الإلكترونية، وأجهزة التحكم والإدارة، مما يسهم في تسيير السفن بكفاءة واستدامة.

تلعب جودة الطاقة الكهربائية دورًا محوريًا في تقليل المخاطر المرتبطة بالتشوهات الكهرومغناطيسية والأعطال الفنية. فالتحديات التي تواجه مصممي أنظمة الطاقة البحرية تتنوع بين اختيار عدد المولدات المناسب وتحديد القدرة الاسمية لكل مولد. هذا الاختيار يتطلب تحقيق توازن دقيق بين تلبية الاحتياجات القصوى للقدرة الكهربائية والعمل على تحسين استهلاك الوقود النوعي لتحقيق الفعالية الاقتصادية والبيئية.

التغيرات العشوائية والاضطرارية في حمولات السفن تفرض على المهندسين أهمية استخدام نماذج حساب الاحتمالات لتحديد القيم القصوى والدنيا للقدرة المطلوبة [1]. عدم الدقة في تحديد هذه القيم قد يؤدي إلى عواقب وخيمة، مثل العجز في إمداد الطاقة أو زيادة تكاليف التشغيل الناتجة عن استهلاك الوقود غير الكفاء. هذه العوامل تؤثر بشكل مباشر على وظائف السفن وسلامتها، لاسيما في الظروف البحرية القاسية.

من ناحية أخرى، تطور أنظمة الدفع في السفن، سواء التقليدية أو الكهربائية، يفرض تحديات جديدة تتعلق بالتوافق الكهرومغناطيسي والتشوهات الناتجة عن التوافقيات العليا [2]. تقديم حلول مبتكرة لهذه التحديات يتطلب استخدام تقنيات متقدمة، مثل التشبيه الحاسوبي ببرنامج الماتلاب، لتطوير نماذج تتيح تحسين أداء الشبكات الكهربائية في السفن وضمان استقرارها.

جاء في تقرير التوجهات العالمية البحرية 2030 و (Global Marine Trends 2030) هو تقرير شامل يتناول المستقبل المتوقع لقطاع الملاحة البحرية بحلول عام 2030. التقرير يستعرض مجموعة من العوامل والتطورات الرئيسية التي يتوقع أن تؤثر على هذا القطاع الحيوي.

هذه بعض النقاط البارزة في التقرير:

التكنولوجيا البحرية المتقدمة: التوجهات نحو استخدام تقنيات مبتكرة مثل الذكاء الاصطناعي والأتمتة وأنظمة الدفع الكهربائية لتحسين الكفاءة التشغيلية وتقليل الانبعاثات.

الاستدامة البيئية: التركيز على الحلول المستدامة للطاقة واستخدام الوقود النظيف للحد من التأثيرات البيئية السلبية وتعزيز الحفاظ على البيئة البحرية.

تغيرات التجارة العالمية: التوجهات المتوقعة في حركة التجارة البحرية والنقل البحري وتأثيراتها على الاقتصاد العالمي وسلاسل الإمداد.

الأمن البحري: التحديات الأمنية المتزايدة في البحار، بما في ذلك القرصنة والتهديدات السيبرانية والتوترات الجيوسياسية.

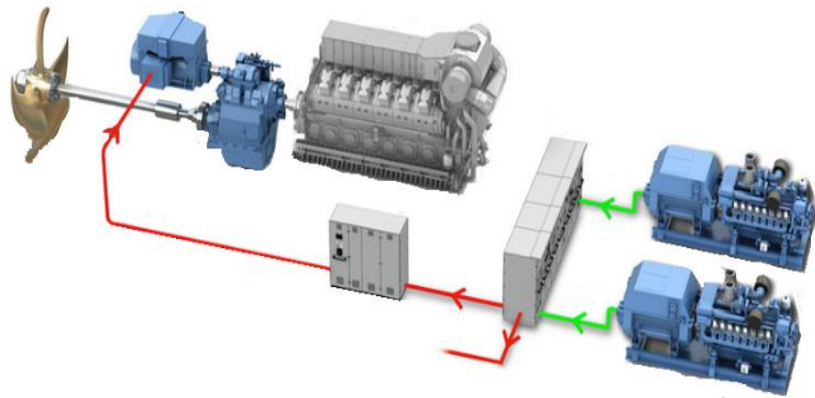
الاقتصاد الأزرق: تعزيز الاقتصاد الأزرق الذي يعتمد على استخدام الموارد البحرية بطرق مستدامة لدعم التنمية الاقتصادية.

التقرير يقدم نظرة مستقبلية تعتمد على تحليل البيانات والاتجاهات الحالية لتوقع ما يمكن أن يشهده القطاع البحري من تطورات وتحولات خلال العقد القادم.

وفي هذا السياق، تكمن أهمية الورقة البحثية في مناقشة الأبعاد التصميمية والعملية لاختيار وتحسين أنظمة الطاقة الكهربائية في السفن، مع التركيز على تحقيق التوازن بين الكفاءة الاقتصادية والسلامة التشغيلية. هذا التوازن يعتبر ضرورة ملحة لضمان التشغيل المستدام والفعال للسفن في الأسواق البحرية التنافسية اليوم.

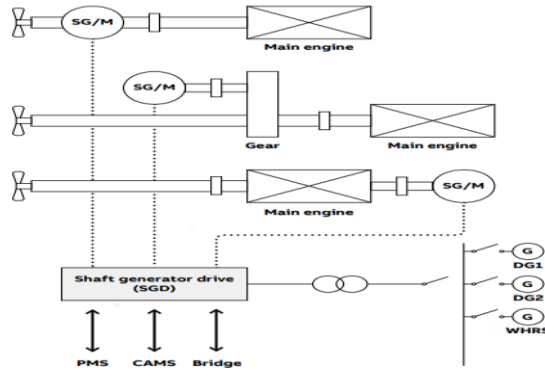
### 1. منظومات الدفع التقليدية، الهجينة، والكهربائية

تعتمد أنظمة الدفع التقليدية على استخدام محركات احتراق داخلي لإنتاج القدرة اللازمة لتحريك العمود الرافسي، حيث يتم توصيل المحرك بالرافص ميكانيكيًا. تم تحسين هذا النظام بإضافة مولد يتصل مع صندوق تروس ويتغذى من محور العمود الرافسي، ويُعرف هذا المولد باسم مولد عمود الرافص، كما هو موضح في الشكل 1.



شكل (1): منظومة دفع توليد في سفينة ذات دفع تقليدي.

لاحقًا، تم تطوير هذه الفكرة بحيث يمكن للمولد العمودي العمل كمحرك أيضًا، وهذا يعود إلى طبيعة الآلات الكهربائية التي يمكنها العمل كمحركات أو مولدات. ساهم هذا التطوير في تحسين الأداء وتقليل القدرة الكلية المثبتة على السفن [3]. المخطط الصندوقي لهذا النظام موضح في الشكل 2.



شكل (2): مخطط لمنظومة دفع توليد في سفينة ذات دفع هجين.



شكل (3): منظومة دفع وتوليد في سفينة ذات دفع هجين مع استخدام البطاريات.

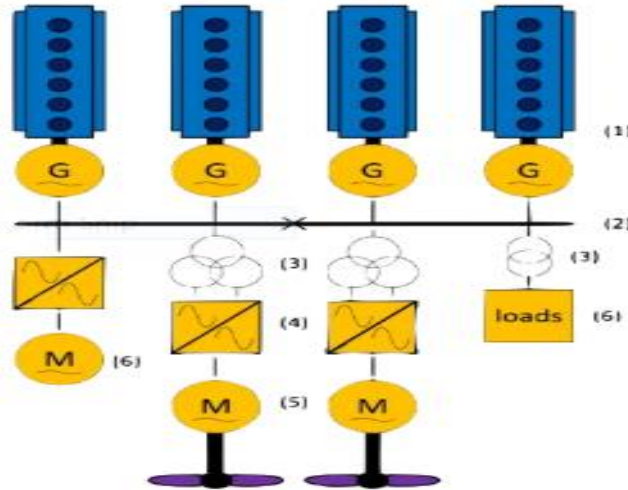
مع تقدم تقنيات القدرة الإلكترونية، أصبح التحكم في المحركات الكهربائية يتم بواسطة أجهزة إلكترونية، وخصوصاً باستخدام ترانزستورات IGBT. هذا الحل يسمح باستخدام البطاريات لتغذية المحركات الكهربائية عبر العواكس الجهدية، التي يمكن تغذيتها بدورها من المولدات أو من البطاريات. يُعرف هذا النظام باسم نظام الدفع الهجين، كما هو موضح في الشكل 3. أما الشكل 4 يعرض حلاً فعلياً لمحرك دفع هجين من شركة MAN. أنظمة الدفع الهجين، مرنة ولها العديد من المزايا مثل خفض الانبعاثات، توفير الوقود، تقليل الضوضاء والاهتزازات، وأكثر موثوقية.



شكل (4) محرك ديزل هجين انتاج شركة "مان".

الشكل 5، يقدم مخططاً لنظام دفع كهربائي يحتوي على مولدات كهربائية، تتكون من محركات ديزل (1) تغذي آلات مترامنة تعمل كمولدات وترتبط معاً في شبكة تيار متغير. هذه الشبكة تغذي الأحمال

المختلفة (6) أو نظام الدفع عبر محولات نوع تيار متغير لتغذية المحركات الكهربائية الدافعة للرفاصات (5). أما بالنسبة للمحركات الأخرى مثل مضخات الحريق وغيرها، فيمكن تغذيتها أيضاً عبر أجهزة القدرة الإلكترونية.



شكل (5): منظومة توليد في سفينة ذات دفع كهربائي.

من التطورات المهمة في نطاق الدفع الكهربائي في السفن (بداية في الدفع الكهربائي للسيارات) هو التطورات الحادثة بدناميكية كبيرة في تقنيات تخزين الطاقة عموماً وفي نطاق البطاريات خصوصاً، وخاصة البطاريات الصلبة و **LFP**، تسهم بشكل كبير في تحسين كفاءة أنظمة الدفع الكهربائي للسفن. هذه البطاريات توفر قدرة أكبر، وزن أقل، وأمان أعلى، مما يجعلها مثالية لاستخدامها في السفن الكهربائية. بالإضافة إلى ذلك، تساهم في تحقيق انتقال ناجح إلى استخدام الطاقة المتجددة، مما يجعل عمليات السفن أكثر استدامة وفعالية.

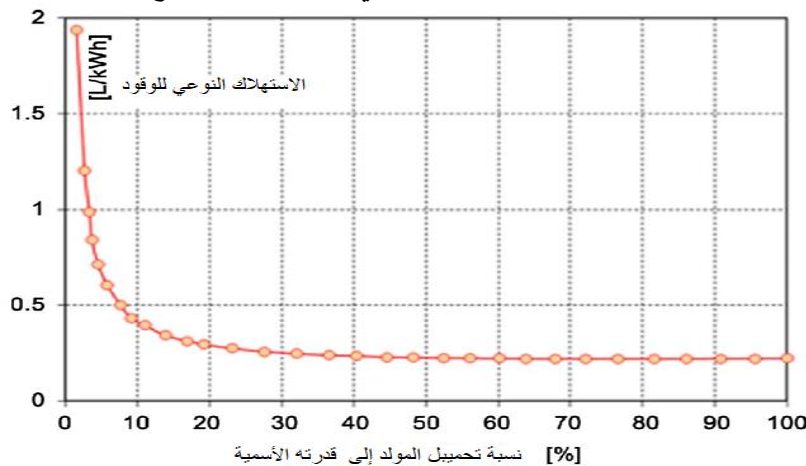
يشهد مجال الدفع الكهربائي للسفن تطوراً كبيراً بفضل التقدم الحادث في تقنيات البطاريات الكهربائية كوسائل لتخزين الطاقة. البطاريات تلعب دوراً أساسياً في تمكين العديد من التقنيات الحديثة، فهي جزء لا يتجزأ من الحياة المتنقلة والإنتاج الضخم للمركبات الكهربائية (**EVs**). تعد تقنيات البطاريات وتخزين الطاقة أساسية في الانتقال إلى الطاقة المتجددة.

عصر الليثيوم: بفضل مزيج الليثيوم (**Li**) الفريد من الخفة وكثافة الطاقة العالية، من المتوقع أن تهيمن البطاريات القائمة على الليثيوم على هذا القطاع في المستقبل القريب. تعني التقدمات الأخيرة في كثافة الطاقة لبطاريات فوسفات الحديد الليثيوم (**LFP**) أن تكنولوجيا **LFP** ستنافس بشكل متزايد

بطاريات الليثيوم أيون في تطبيقات المركبات الكهربائية (EV) والتخزين الثابت للطاقة. تعتمد شركات مثل تسلا و BYD على بطاريات LFP في بعض نماذج المركبات الكهربائية. البطاريات الصلبة: تستبدل البطاريات الصلبة الإلكترونية السائل بمادة صلبة مثل الزجاج أو السيراميك، مما يقلل بشكل كبير من وزن حزمة البطارية. البطاريات الصلبة أصغر حجمًا، مما يسمح لمصنعي البطاريات بتكديس المزيد من الخلايا لكل متر. تجمع هذه الخاصية مع كثافة الطاقة العالية للإلكترونيات الصلبة، مما يزيد من سعة البطارية. الإلكترونيات السائلة عرضة لظاهرة التبخر عند درجات الحرارة العالية، حيث يتحول السائل إلى غاز، مما يؤدي إلى احتراق حزمة البطارية. البطاريات الصلبة أكثر أمانًا للتشغيل في درجات حرارة عالية ويمكنها تحمل أحمال أكبر. من المتوقع أن يسيطر سوق البطاريات الصلبة الذي تبلغ قيمته 6 مليارات دولار أمريكي على العالم بحلول عام 2030، مدفوعًا بازدهار المركبات الكهربائية. ستصبح البطارية الصلبة قريبًا جزءًا من حزم البطاريات المتوفرة في الأسواق.

البدايل الحية: البدائل الرئيسية للبطاريات القائمة على الليثيوم تشمل خلايا وقود الهيدروجين، المكتفات الفائقة، وأنظمة تخزين الحرارة. هذه البدائل تقدم حلولاً مبتكرة ومكملة لتقنيات البطاريات الحالية.

## 2. اختيار قدرة وعدد المولدات في السفن ذات الدفع التقليدية



شكل (6) مثال لمنحنى للاستهلاك النوعي للوقود في مولد ديزل.

يعتمد تحديد عدد وقدرة المولدات على حالتين حديتين: الحالة الأولى هي القيمة القصوى المتوقعة للطلب على القدرة الكهربائية، والحالة الثانية هي الحد الأدنى للقدرة المتوقعة للطلب على الطاقة الكهربائية.

معرفة القيمة القصوى للطلب على القدرة تحدد القدرة الكلية لمجموع المولدات التي يتم تركيبها في القطعة البحرية، حيث يجب أن تكون قدرة هذه المولدات أكبر من القيمة القصوى المتوقعة. بعد ذلك، يتم إضافة مولد آخر بقدرة تساوي قدرة أكبر مولد من المولدات العاملة بالتوازي.

تحديد حالة الحد الأدنى للقدرة يسمح بتحديد قدرة المولد الواحد بحيث لا تتجاوز قدرته ضعف هذه القيمة. بمعنى آخر، يتم تحميل المولد بنسبة 50% من قدرته الاسمية في هذه الحالة، مما يضمن استهلاكًا نوعيًا جيدًا للوقود كما هو مبين في الشكل 6.

توجد طرق عديدة لتحديد القيم المذكورة، منها الطرق الإحصائية والحسابية، بالإضافة إلى بعض الخوارزميات الجينية وغيرها. تعتمد هذه الطرق بشكل أساسي على تقسيم الأحمال إلى مجموعات ذات وظائف مشتركة، وتحديد حالات العمل المختلفة مثل حالة الإبحار وحالة التوقف في الميناء.

في كل حالة من هذه الحالات ولكل مجموعة، يتم تحليل احتمالية ظهور الأحمال بمشاركة زمنية معينة، ثم بناءً على ذلك يتم تحديد القدرة وإدخال التصحيحات مثل معامل المشاركة الزمنية ومعامل القدرة. لكل حالة من الحالات يتم تعيين القدرة الكلية، ثم يتم تحديد عدد المولدات بحيث تكون قدرتها الإجمالية مساوية لأقصى قيمة تم الحصول عليها، وهي في العادة تكون أثناء أداء السفينة لمهامها مثل التفريغ والشحن في الموانئ حيث تعمل جميع معدات السفينة بكامل طاقتها.

كما يتم تحديد أقل قيمة للقدرة بحيث يكون هناك مولد قدرته لا تتجاوز ضعف هذه القيمة، مما يضمن استهلاك الوقود بكميات اقتصادية. الجدير بالذكر أن حالات الإبحار هي التي تستمر لفترات طويلة، بعكس حالات التفريغ والشحن التي تكون لفترات زمنية محدودة مع أن الحمولات تكون فيها بعدها الأقصى. لذلك، يكون استهلاك الوقود النوعي أثناء الإبحار أمرًا حاسمًا.

### 3. طرق تعيين قدرة وعدد المولدات في السفن ذات الدفع التقليدي

هناك العديد من الطرق لتصميمات محطات توليد الطاقة الكهربائية للأغراض العامة.

1. طريقة التناظر والتناسب: وتعتمد على القياسات للسفن النموذجية مثل السفن ذات المحركات الصغيرة، ولا يلزم إجراء تحليل مفصل لتشغيل جميع الأجهزة الكهربائية، ويعتمد المصمم على البيانات التي تم الحصول عليها أثناء اختبارات محطات الطاقة أثناء تشغيل السفن من نفس النوع أو السفن المماثلة.



## 2. الطرق التحليلية الحسابية:

تعتمد الطرق التحليلية على إعداد موازنة متوقعة للطاقة الكهربائية أثناء تصميم السفينة. هذا يتضمن دراسة مفصلة للطاقة المطلوبة لكل جهاز كهربائي أو مستهلك للطاقة على متن السفينة. يتم تحليل عمل كل جهاز في حالات التشغيل المختلفة للسفينة، مثل حالات الإبحار الكاملة، والتحرك في الموانئ، وفي حالات الطوارئ.

عن طريق فهم كيفية استخدام الطاقة في هذه الظروف المختلفة، يمكن للمهندسين تصميم نظام طاقة كهربائية يلبي احتياجات السفينة بكفاءة. على سبيل المثال، يمكن أن يتم توزيع المولدات الكهربائية على السفينة بشكل يجعلها تعمل بأقصى كفاءة في كل حالة تشغيل.

## 3. الطرق الإحصائية:

تعتمد الطرق الإحصائية على تحليل احتمالية تشغيل كل جهاز كهربائي على متن السفينة في وقت معين. يتم ذلك من خلال جمع بيانات تشغيل الأجهزة على مدار فترة زمنية طويلة وتحديد الأنماط في استخدام الطاقة.

هذا النهج يسمح بتقدير الطلب على الطاقة بشكل أكثر دقة. فعلى سبيل المثال، إذا كانت هناك بيانات تشير إلى أن بعض الأجهزة الكهربائية لا تعمل إلا لفترات قصيرة وباحتمالية منخفضة، يمكن تصميم نظام الطاقة ليكون أقل قوة ولكن أكثر كفاءة في استخدام الوقود.

## 4. تطبيق الأساليب:

باستخدام مزيج من الطرق التحليلية والإحصائية، يمكن للمهندسين تحسين تصميم نظام الطاقة الكهربائية على السفينة ليكون أكثر كفاءة ويقلل من الاستهلاك النوعي للوقود. هذا النهج لا يساعد فقط في تقليل تكاليف التشغيل، بل يساهم أيضًا في تقليل الانبعاثات البيئية وزيادة موثوقية السفينة [1]. باختصار، الأساليب التحليلية والإحصائية هي أدوات حيوية تساعد في تصميم أنظمة طاقة بحرية تلبى المتطلبات الحديثة وتواجه التحديات المتزايدة في كفاءة الطاقة والسلامة البيئية.

كمثال حسابي مدرسي، موثق [4] سنقسم أجهزة ومعدات السفينة إلى سبع مجموعات:

- المجموعة الأولى مج1: الآلات المساعدة لمحركات الدفع الرئيسية.

- المجموعة الثانية مج2: الآلات المساعدة لحجرة المحركات

- المجموعة الثالثة مج3: أجهزة "الأجهزة الكهرو-منزلية على السفينة" تشمل هذه الأجهزة مختلف المعدات التي تُستخدم لأغراض متنوعة مثل الطهي، والتنظيف، والغسيل، وما إلى ذلك.
- المجموعة الرابعة مج4: أجهزة ومعدات السطح.
- المجموعة الخامسة مج5: التدفئة والتكييف والتبريد.
- المجموعة السادسة مج6: الإضاءة.
- المجموعة السابعة مج7: أجهزة الملاحة والاتصالات.

جدول 1: مثال مرجعي لموازنة القدرة بسفينة نقل بضائع حسب [4].

ح6	ح5	ح4	ح3	ح2	ح1		
180.6	143.6	180.6	-	-	143.6	مج1 kW	س1
64.7	123.1	231.7	52	51.1	101	مج2 kW	س2
2.2	32	40.4	32	32	40.4	مج3 kW	س3
8.9	8.9	57	431.1	90.3	8.9	مج4 kW	س4
16	319.7	319.7	243.4	243.4	319.7	مج5 kW	س5
26	26	29.2	43.5	31.7	26	مج6 kW	س6
6.4	6.4	7.5	0.5	0.5	6.4	مج7 kW	س7
124.3	516.2	685.5	802.5	449	502.5	مجموع مج2 إلى مج7	س8
99.36	412.9	548.4	642	359.2	402	س9 * 0.8 (معامل مشاركة زمنية)	س9
279.96	556.5	729	642	359.2	545.6	مج1 + س9	س10
288.36	573.2	750.9	661.3	370	562	س11 * 1.03 (3% فاقد)	س11
360.45	716.5	938.6	826.6	462.5	702.4	س11 \ 0.8 من kW إلى kVA	س12
800*1	800*2	800*1	800*2	800*1	800*1	قدرة المولدات [kVA]	س13
800 * 3 مولد إضافي حسب 101 شروط مؤسسات التصنيف						عدد وقدرة المولدات المختارة [kVA]	س14
44.8	89.6	58.6	51.6	57.8	87.8	نسبة التحميل [%]	س15

ونقسم حالات العمل الى ستة حالات:

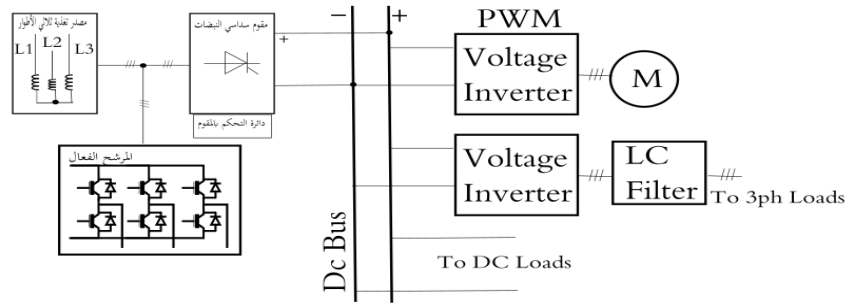
- حالة الإبحار 1
- حالة التوقف في الميناء 2
- حالة الشحن والتفريغ 3
- حالة المناورات 4 (الدخول والخروج من الميناء، عمليات انقاذ وما شابه)
- حالة العطب 5
- حالة ما بعد الاظلام التام 6
- تم توضيح عملية موازنة القدرة لسفينة نقل بضائع مختارة في الجدول 1. في السطر الأول "س1"، تم وضع المجموعة رقم واحد "مج1" لكل الحالات (الأولى ح1، إلى السادسة ح6).

يتكرر نفس الشيء بالنسبة للمجموعة الثانية في السطر الثاني "س2"، والقدرات مُعطاة بالكيلوواط. السطر الثامن "س8" يمثل مجموع القدرات للمجموعات من الثانية إلى السابعة. في السطر التاسع "س9"، يتم ضرب هذه القدرات بمعامل المشاركة الزمنية، والذي يتم تحديده بناءً على دراسة احتمالات العمل المشترك. في السطر العاشر، يتم إضافة السطر التاسع إلى السطر الأول الذي يخص المجموعة الأولى، أي مجموعة الآلات المساعدة لمحركات الدفع، حيث أن هذه المجموعة تعمل فقط أثناء الإبحار. في السطر الحادي عشر "س11"، تتم إضافة قدرة بنسبة 3% لتغطية الفاقد في الكوابل والآلات الكهربائية. في السطر الثاني عشر "س12"، يتم حساب القدرة بالكيلو فولت أمبير، والتي تعرف بالقدرة التصميمية وقيمتها تكون أكبر بالتقسيم على معامل القدرة. في السطر الثالث عشر، يتم محاولة إيجاد مولدات فعلية بحيث تكون قيمتها أكبر من القيمة في السطر الثاني عشر، ويتم البحث عن مولدات ذات قدرة متساوية بحيث تعمل بشكل منفرد أو بالتوازي. في المثال المذكور، تم إيجاد اثنين من المولدات بقدرة 800 كيلو فولت أمبير لكل مولد.

في السطر الرابع عشر، تم تحديد القدرة الكلية للمحطة والتي تتكون من ثلاث مولدات، كل مولد بقدرة 800 كيلو فولت أمبير. هذا المولد الثالث يُعتبر مولد إضافي ناتج عن متطلبات مؤسسات التصنيف، ويُطلق عليه البعض "المولد الاحتياطي"، وهذه تسمية غير دقيقة. هذا المولد ليس احتياطياً، بل إضافياً ويعمل بالتناوب مع المولدات الأخرى. وأيضاً، ليس هو المولد الاضطراري. المولد الاضطراري هو مولد موجود فوق خط الماء ومهمته تأمين الاتصال في حالات الحوادث البحرية المتعلقة بسلامة الأشخاص، بينما المولد الإضافي يضمن عمل السفينة بشكل كامل حتى عند تعطل أحد المولدات، وله علاقة بسلامة البضائع المنقولة وليس الأشخاص.

#### 4. مقترح محطة توليد في السفن ذات الدفع الكهربائي

تعتمد أنظمة الدفع الكهربائية الحديثة في السفن على استخدام مولدات كهربائية موزعة في أماكن غير مخصصة لتخزين البضائع وحركة الأفراد، وعادةً ما تكون على جوانب السفينة من اليمين والميسرة. تعتمد هذه الأنظمة أيضاً على محركات كهربائية يتم التحكم في سرعتها وعزمها باستخدام أجهزة القدرة الإلكترونية، وهو ما سيتم افتراضه في هذا المقترح.



شكل (7) منظومة قوى كهربائية مقترحة قيد الدراسة والتحليل

الجزء الخاص بالدفع، أي العواكس الجهدية والمحركات الكهربائية، ليس ضمن نطاق هذه الورقة البحثية التي تركز على جانب التوليد والتوزيع للطاقة الكهربائية. يعتمد المقترح على استخدام مولدات ديزل مجهزة بمقوم موجه سداسي النبضات لإنتاج جهد تيار ثابت على شبكة قضبان التيار المستمر. يتم توصيل جميع المولدات بهذه الطريقة على هذه القضبان لتعمل معًا بالتوازي. يهدف استخدام التيار الثابت هنا إلى تسهيل مزامنة المولدات مع بعضها البعض دون الحاجة إلى أجزاء مكلفة أو تقنيات عالية للربط، وكذلك لتحقيق نقل القدرة بكفاءة عالية من حيث الطاقة، الهبوطات الجهدية، والفاقد في القدرة. التحميل على المولد بدائرة غير خطية، الذي يمثله المقوم سداسي النبضات، يسبب ظهور توافقيات عليا في تيارات المولد المتزامن وارتفاع معامل التشوه الهارموني. يؤدي هذا إلى عدم القدرة على الاستفادة من قدرة المولد بشكل كامل، مما يسبب فقدان يصل إلى 30% من القدرة الاسمية بسبب انخفاض معامل القدرة وزيادة معامل التشوه الهارموني.

للد من هذه الظواهر السلبية، تم اقتراح إضافة مرشح فعال يعمل وفق خوارزمية فريزييه [5] كما هو مبين في الشكل 7.

##### 5. مقارنة تفضيلية بين محطات التوليد في السفن ذات الدفع التقليدي والكهربائي

تغيير نوع الدفع من الدفع التقليدي إلى الدفع الكهربائي مروراً بالدفع الهجين [6] يؤثر بشكل كبير على تصميم محطة التوليد. على الرغم من أن الاختلافات قد تبدو بسيطة في البداية، إلا أنها في الحقيقة اختلافات جوهرية يمكن أن توفر ما يقارب 40% من القدرة الإجمالية المثبتة على السفينة. الاختلافات الرئيسية:

- توزيع القدرة: تعتمد السفن التقليدية على نظام دفع يستحوذ على الجزء الأكبر من القدرة المثبتة، والذي يتراوح بين 70% إلى 90% في حالة السفن السريعة. هذا يعني أن نصف القدرة الاسمية

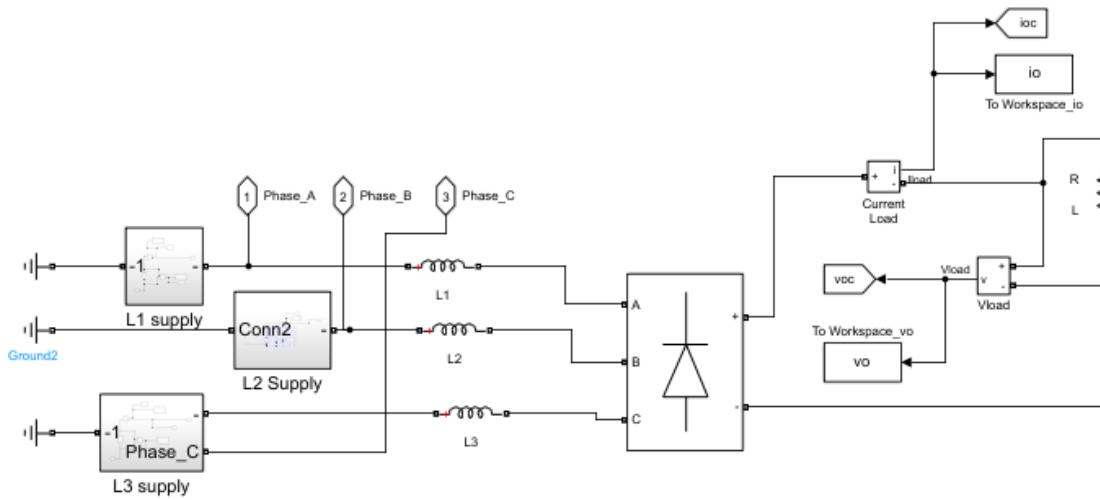
للمحركات الرئيسية قد لا يتم الاستفادة منها بشكل فعلي خلال معظم فترة استخدام السفينة، حيث تتحرك بسرعات اقتصادية.

- مولد عمود الرافص: في الماضي، تم استخدام مولد عمود الرافص لاستغلال الفائض من القدرة. ومع ذلك، كان هذا الحل مكلفًا ومعقدًا، ويتسبب في مشاكل إضافية مثل الاهتزازات.
- التحكم الدقيق في المحركات: في أنظمة الدفع الكهربائية، يمكن التحكم بالمحركات الكهربائية بدقة ومرونة أكبر باستخدام خوارزميات تحكم متقدمة. هذا يقلل من الحاجة إلى قدرة عالية للمناورة، مما يقلل من عدد المولدات المطلوبة.
- التصميم الأكثر كفاءة: رفع كفاءة المولدات الكهربائية يمكن تحقيقه عن طريق تحسين معامل القدرة وترشيح التوافقيات العليا، مما يزيد من كفاءة استخدام المولدات.
- المولدات الإضافية: تفرض مؤسسات التصنيف البحري وجود مولد إضافي بقدرة مساوية لأكبر مولد مثبت على السفينة، لضمان زيادة الموثوقية. ومع ذلك، في أنظمة الدفع الكهربائي، يكون هناك فائض طبيعي في القدرة يمكن استغلاله، مما يثير الحاجة إلى إعادة تقييم هذا الشرط. وكنتيجة إلى ما سبق وبالنظر إلى الفوائد المتعددة لأنظمة الدفع الكهربائي، يبدو من الواضح أن التحول نحو الدفع الكهربائي يمكن أن يؤدي إلى تحسينات كبيرة في الكفاءة وتقليل التكاليف والمخاطر، بالإضافة إلى تعزيز المرونة والقدرة على المناورة للسفن البحرية.

## 6. الدراسة التشبيهية

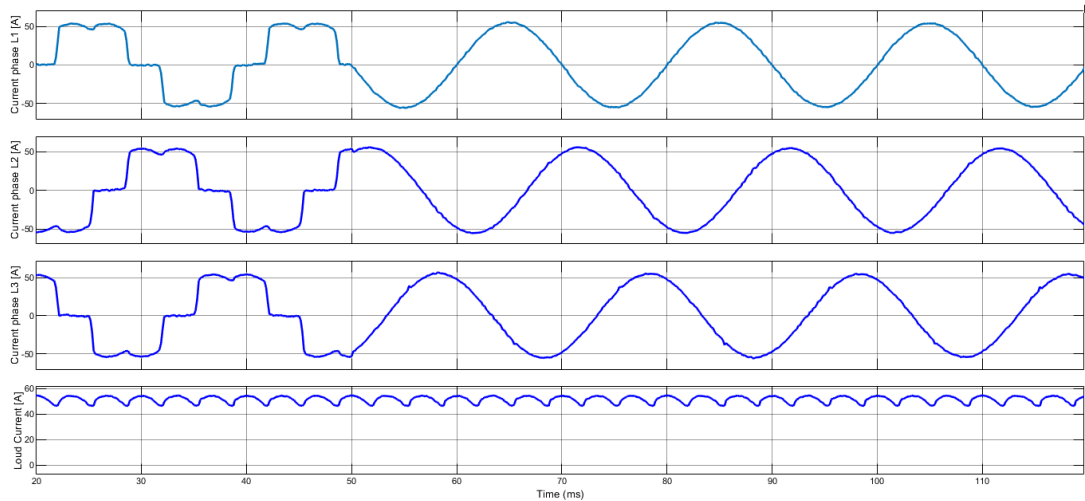
على الشكل 8 تم تقديم الدائرة التشبيهية لجزء التوليد في المنظومة المقترحة الشكل 7 في برنامج الماتلاب سيمولينك **Matlab-Simulink**، وتتكون هذه الدائرة من ثلاثة مصادر تغذية تمثل الاطوار الثلاثة للمولد موصلة مع مقوم سداسي النبضات غير محكوم يغذي بدوره دائرة الجهد الثابت، ويتم التوصيل عن طريق ملفات لتنعيم التيار وكذلك لتقليل تيارات القصر.

بين المولد وبين هذه الملفات يتم توصيل نهايات المرشح الفعال والذي يعمل بأجهزة القدرة الإلكترونية مثلًا بترانزستورات **IGBT** وفق احد الخوارزميات المعروفة. في هذا المثال تم استعمال الخوارزمية التي تعمل وقوانين فريزيه وذلك بغرض تحسين شكل موجه التيار ورفع معامل القدرة الى قيمته القصوى الا وهي واحد [5].



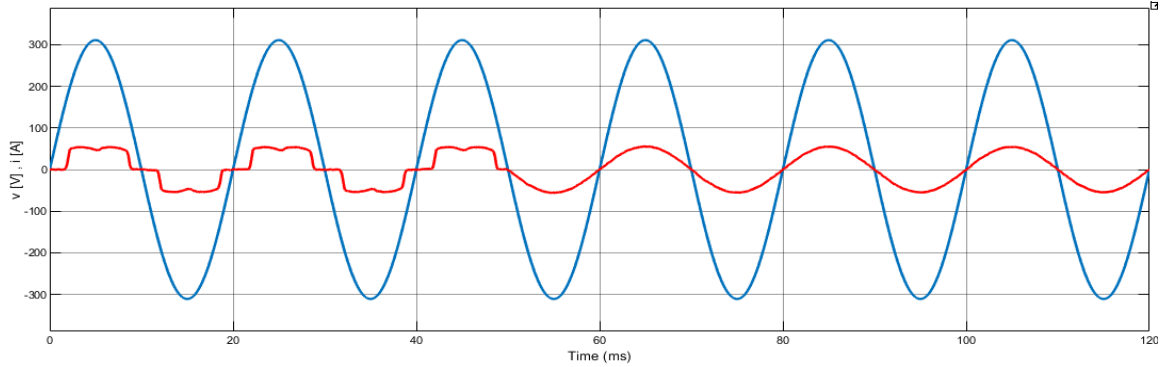
شكل (8) دائرة التشبيه الحاسوبي لعمل المولد في الشبكة المقترحة

على الشكل 9 تم اعطاء الموجة اللحظية للتيارات الطورية للمولد. نلاحظ في الزمن 50 ملي ثانية بدأ اشتغال المرشح الفعال مما تسبب في تغير شكل الموجة اللحظية للتيارات الطورية من موجات نبضية تحتوي على توافقيات عليا للتيار الى موجة جيبيية شبه نقيه.

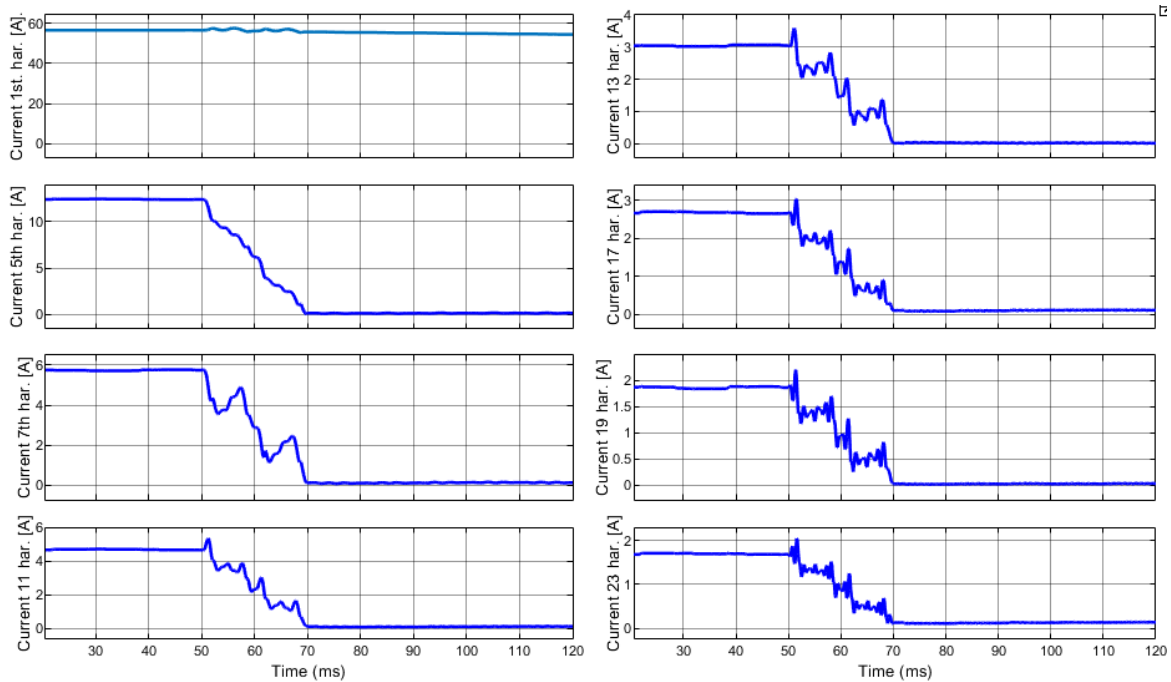


شكل (9): تيار التحميل على المولد قبل وبعد تشغيل المرشح الفعال (للاطوار الثلاث وخرج المقوم).

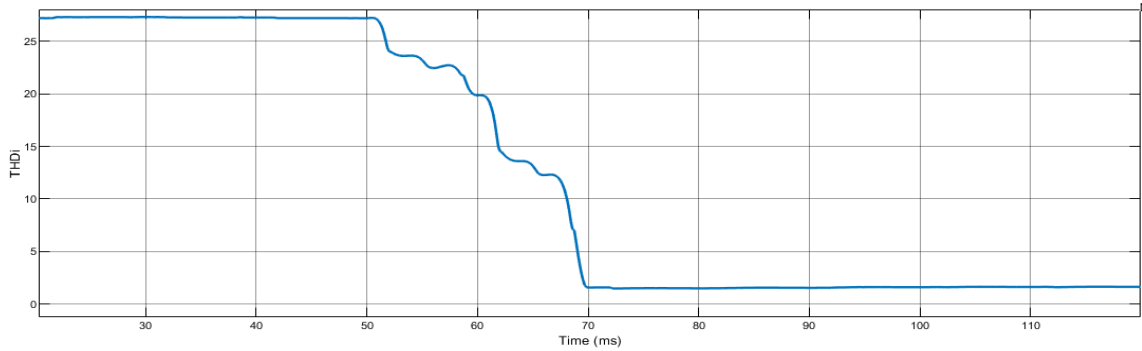
على الشكل 10 تم وضع الموجة اللحظية للجهد الطوري مع الموجة اللحظية للتيار الطوري، ونلاحظ هنا عدة أمور؛ بداية ان شكل الموجة اللحظية لتغير من شكل نبضي الى شكل جيبي شبه نقي، وهو ما تم ذكره أعلاه. ثانيا ان التيار الطوري يكون في طور واحد مع الجهد الطوري مما يعني رفع معامل القدرة الى الواحد. تحسن شكل الموجة اللحظية واضح حتى بالعين المجرة مما يعني اضمحلال في قيمة التوافقيات العليا.



شكل(10): موجة الجهد الطوري على نهايات المولد والتيار التحميل عليه قبل وبعد تشغيل المرشح الفعال. على الشكل 11 تم وضع منحنيات تمثل تغير قيمه المطالات للتوافقيات الأساسية والعليا. المنحنى الأول من الاعلى من اليسار يمثل مطال التوافقية الاولى (الأساسية) ونلاحظ انه لا يتغير لأن هذه التوافقية، هي المسؤولة عن نقل القدرة الى المستهلكات. المنحنى التالي يمثل تغير المطال للتوافقية الخامسة، ونلاحظ هنا بشكل واضح اختفائها بالكامل بعد ان كانت قيمة المطال في حوالي 12 امبير. المنحنى الثالث من الأعلى يسارا يمثل تغير مطال التوافقية السابعة، ونلاحظ نفس الشيء اي اختفاء التوافقية السابعة للتيار بعد تشغيل المرشح الفعال. في الشكل الرابع تم تقديم التوافقية رقم 11 ثم وبالترتيب 13 17 19 23 ونلاحظ ان هذه التوافقيات كلها تقل بشكل ملحوظ. الجدير بالذكر هنا ان المقوم سداسي النبضات يتسبب في ظهور توافقيات عليا الى جانب التوافقية الأساسية متمثلة بالتعبير  $6 * n \mp 1$ .



شكل(11) تغير مطال التوافقيات المختارة قبل وبعد تشغيل المرشح الفعال.

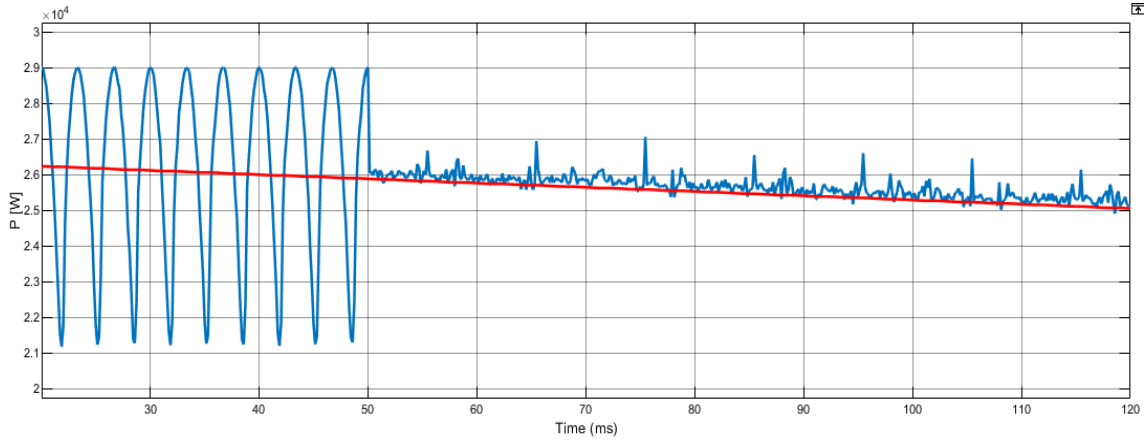


شكل(12): تغير قيمة التشوه الهرموني لموجة الجهد، قبل وبعد تشغيل المرشح الفعال.

على الشكل 12 تم تقديم تغير منحني التشوه الهرموني للتوافقيات العليا في منحني التيار **THDi** ونلاحظ انه بدءاً من الزمن 50 ملي ثانية، وهو الوقت الذي تم فيه تشغيل المرشح الفعال، وخلال فترة واحدة فقط، اي 20 ملي ثانية اضمحلت قيمه هذا المعامل من حوالي 27% الى 2% مما يدل على تحسن كبير جدا في شكل الموجة اللحظية، حيث هكذا منحني يلبي حتى المتطلبات لشبكات التوزيع الأرضية ناهيك عن الشبكات البحرية. المواصفات البحرية لا تتطلب تحسن بهذا الشكل ويكفي ان يكون اقل من 5% مثلا هذا التحسن في شكل الموجة التيارية، ملحوظ حتى بالعين. هذا تحسن مهم جدا من الناحية العملية، حيث أن تقليل مطالات التوافقيات العليا له معانٍ عملية وينعكس بشكل مباشر على رفع الكفاءة لمنظومة القوى، التقليل من وتيرة حدوث الاعطاب، وخصوصاً انهيار العوازل الكهربائية في الكوابل والمحولات والمولدات. التقليل من وتيرة حدوث الاعطاب بالمحولات والمولدات له تأثير مباشر وإيجابي على السلامة البحرية وكذلك على المردود الاقتصادي وأيضاً تقليل حجم المعدات والأجهزة الكهربائية وهذه عوامل في غاية الأهمية في النطاق البحري.

على الشكل 12 تم تقديم تغير الاهتزازات اللحظية لموجة القدرة الفعالة، حيث بعد تفعيل المرشح الفعال اختفت هذه الاهتزازات مما يعني اختفاء القدرة الرد-فعليه المتسببة بالتوافقيات العليا، وهذا ناتج مباشرة من استعمال خوارزميه فريزيه [5]، وكما تم ذكره فإن خوارزمية فريزيه -بالإضافة الى ترشيح التوافقيات العليا- فإنها تزيح تيار التوافقية الاساسية ليكون في الطور مع الجهد الطوري، وبالتالي رفع قيمة معامل القدرة الى الواحد. بكلمات اخرى فإن القدرة الفعالة تساوي تماماً القدرة الظاهرية، مما يعني انه تمت الاستفادة من القدرة التصميمية للمولد بالكامل. الجدير بالذكر هنا أن معامل قدرة 0.8 يسبب في عدم الاستفادة من 20% من قدرة المولد، كما افترضناها في المثال الحسابي المذكور (السطر 12 بالجدول رقم 1).





شكل(12): تذبذب القيمة اللحظية للقوة الفعالة على اطراف المولد.

## الخلاصة:

تناقش هذه الورقة البحثية عملية اختيار القدرة الكلية لمحطة التوليد الكهربائية، بما في ذلك تحديد عدد وقدرة المولدات. يتم ذلك مع مراعاة القيمة القصوى المتوقعة للطلب على الطاقة، وكذلك أدنى قيمة ممكنة للتشغيل لتقليل استهلاك الوقود النوعي. يُراعى في هذه العملية معايير المؤسسات البحرية التي توصي بإضافة مولد إضافي يعمل بالتناوب مع المولدات الأخرى. تتطلب القدرة الإجمالية لمحطة التوليد أن تكون أعلى من الطلب الأقصى المتوقع بالإضافة إلى قدرة أكبر مولد تم تصميمه. في السفن ذات الدفع التقليدي، يتم تخصيص الجزء الأكبر من القدرة للمحرك الرئيسي (الرفاص)، والتي تتراوح بين 60 إلى 80% من القدرة الإجمالية للسفينة، والباقي لمحطة التوليد. قديماً تم تطوير حلول مثل تركيب مولد عمود الرفاص لتزويد السفينة بالطاقة الكهربائية أثناء الإبحار، مما يساهم في تقليل عدد المولدات المطلوبة وتحسين استهلاك الوقود وزيادة فترة الصيانة.

في نظم الدفع الهجين، يمكن للمحرك الكهربائي أداء مهمتين: الدفع وتوليد الطاقة، مما يحسن الأداء وكفاءة استهلاك الوقود ويقلل القدرة الكلية المطلوبة. أما في نظم الدفع الكهربائي، تُعتبر القدرة الكلية المثبتة هي القدرة الكهربائية. الفائض من قدرة الدفع يمكن استخدامه لتغذية الأجهزة الكهربائية، مما يقلل من القدرة الكلية لمحطة التوليد.

من المشاكل التي ظهرت هي استخدام أجهزة القدرة الإلكترونية غير الخطية التي تسبب تشوهات في الموجات الكهربائية، مما يؤدي إلى انخفاض معامل القدرة وزيادة التشوهات. هذه التشوهات تؤدي إلى تلف العوازل والأسلاك، مما يزيد من المخاطر ويزيد من الأعباء الاقتصادية.

تم اقتراح استخدام مرشح فعال بخوارزمية فريزيه لتقليل التشوهات وتحسين جودة الطاقة، حيث أظهرت المحاكاة في برنامج الماتلاب تحسينات ملحوظة في شكل الموجات وتقليل التشوهات بنسبة قريبة من 100% ورفع معامل القدرة إلى الواحد تماماً مما يوفر حوالي 30% من القدرة الكلية المثبتة على السفن البحرية.

#### المراجع:

1. Chun-Lien Su, iIEEE Senior Member, Chi-Hsiang Liao, "Ship Electrical Load Analysis Considering Power Generation Efficiency", 2015-PSEC-0035.
2. G. Milev, "Power Quality Problems on Ships with Electrical Propulsion," 2023 15th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/BulEF59783.2023.10406227.
3. S. Li et al., "Research on grid-connected operation of novel Variable Speed Constant Frequency (VSCF) shaft generator system on modern ship," 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo, Japan, 2012, pp. 1-5.
4. Slawomir Wyszowski "Elektrotechnika Okretowa" tom1, Book, Wydawnictwo Morskie Gdansk 1991, ISBN 83-215-0582-1 (Polish).
5. Mansour S. Hashad, Tarek Al-Ayeb, "Control algorithm for shunt active filter based on Fryze power theory", SEBHA UNIVERSITY JOURNAL OF PURE & APPLIED SCIENCES VOL.20 NO. 4 2021, DOI: 10.51984/JOPAS.V20I4.1706 (Arabic).
6. V. Gyurov, G. Ivanova, M. Duganov and S. Rachev, "Comparative Analysis of Reliability Indicators in Conventional and Hybrid SAVE cube Ship Electrical Power Systems," 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10021201.