

"تصميم شبكة كهربائية للسفن البحرية باستخدام OVT ومرشحات LC لتحسين

الاستقرار وتقليل التشوهات الهرمونية"

طارق العائب¹، عادل بالخير²، احمد شاقان³، سفيان عبد المولي⁴

^{1,2} قسم الهندسة الكهربائية، المعهد العالي للتقنيات الهندسية ، طرابلس

tarekalayeb@gmail.com

الملخص

تعتبر الشبكات الكهربائية على السفن البحرية شبكات مضطربة نتيجة لتقارب قدرات بعض الأحمال مع قدرة المولدات الكهربائية. يؤدي توصيل أو فصل هذه الأحمال إلى تأثيرات سلبية على أداء الشبكة الكهربائية للسفينة، مثل تغير قيمة الجذر المتوسط لمربع الجهد وتغير التردد، وهي مشكلات لا تُلاحظ عادة في الشبكات الكهربائية العامة. في السفن ذات الدفع التقليدي، تشكل قدرة محطة التوليد حوالي 40% من القدرة الإجمالية للسفينة، حيث يعتبر "الرفاص" هو أكبر مستهلك للطاقة. أما في أنظمة الدفع الحديثة، فتستخدم محركات كهربائية مزودة بمنظومات قدرة إلكترونية، مما يزيد من عمق المشكلة المتعلقة بالاضطرابات في الشبكة الكهربائية.

في هذه الورقة البحثية، تم اقتراح تصميم شبكة كهربائية تعتمد على نظام توزيع بالتيار الثابت، مع تحويل القدرة إلى شبكات التيار المتغير باستخدام عواكس جهدية تعمل بتقنية المتجهات المتعامدة. وقد أسفرت هذه الطريقة عن إنتاج موجة جهد شبه جيبية بمعامل تشويه هرموني (THD) قدره 10.8%. لتحسين هذه الموجة وتقليل معامل THD، يمكن تكرار نفس التقنية أو استخدام مرشحات فعالة أو غير فعالة. في هذه الدراسة، تم استخدام مرشحات غير فعالة من نوع LC، مما أدى إلى خفض معامل التشوه الهرموني إلى 4%، وهو ما يتوافق مع المتطلبات الخاصة بالشبكات الكهربائية، ليس فقط في السفن، بل أيضًا في الشبكات العامة. على سبيل المثال، النمط الأوروبي لشبكات التوزيع الأرضية يشترط أن لا تتجاوز قيمة 5% THD كما تم إجراء دراسة للتوافقيات العليا لمنحنيات الجهد في الشبكة الكهربائية المقترحة.

الكلمات المفتاحية — الاضطرابات الكهربائية، المعايير الدولية للتوافقيات، مرشحات التوافقيات

(OVT)، التشويه التوافقي (THD)

Abstract

Electrical networks on marine vessels are often unstable due to the close capacities of certain loads and electrical generators. Connecting or disconnecting these loads can have negative effects on the performance of the ship's electrical network, such as changes in the root mean square voltage and frequency, issues not typically observed in public electrical networks.

In traditional propulsion ships, the power of the generating station constitutes about 40% of the total vessel capacity, with the "propeller" being the largest energy consumer. In modern propulsion systems, electric motors equipped with electronic power systems are used, deepening the problem of disturbances in the electrical network.

This paper proposes a design for an electrical network based on a direct current distribution system, converting power to alternating current networks using voltage inverters operating with OVT (Orthogonal Vectors Based Topology). This approach resulted in producing a sine-sinusoidal voltage wave with a total harmonic distortion (THD) of 10.8%.

To improve this wave and reduce the THD, the same technique can be repeated or effective or passive filters can be used. In this study, passive LC filters were employed, which reduced the harmonic distortion to 4%, aligning with the requirements for electrical networks, not only in ships but also in public networks. For example, the European standard for ground distribution networks stipulates that THD should not exceed 5%. A study of the higher harmonics of the voltage waveforms in the proposed electrical network was also conducted.

1. مقدمة

نشأت الطاقة الكهربائية في السفن في أواخر القرن التاسع عشر، حيث كانت السفينة "SS Elbe" (1886) من بين أولى السفن التي استخدمت مولدات كهربائية لتشغيل الإضاءة في ألمانيا. في أوائل القرن العشرين، قدمت السفينة "SS Turbinia" (1894) في المملكة المتحدة نظام دفع كهربائي باستخدام محرك توربيني متصل بمولد كهربائي، مما حسن من كفاءة الأداء. ثم، في الخمسينيات، بُنيت السفينة "MS Tärnö" في السويد كأحد أوائل السفن التي اعتمدت على أنظمة دفع كهربائية بالكامل. خلال السبعينيات والثمانينيات، شهدت تكنولوجيا الشبكات الكهربائية تقدماً كبيراً في توزيع الطاقة [1]. جودة إمداد الطاقة (Power Supply Quality – PSQ) تعبر عن مجموعة من الاضطرابات

التي تؤثر على الشبكات الكهربائية في السفن، مثل الانقطاعات، التقلبات في الجهد، والتوافقيات. يمكن أن تؤدي هذه الاضطرابات إلى مشاكل خطيرة في أداء الأنظمة، مثل تلف الأجهزة وزيادة استهلاك الطاقة. لذا، فإن تحسين PSQ يعد أمرًا حيويًا لضمان سلامة وكفاءة تشغيل السفن، حيث أن أي خلل في الشبكة قد يؤثر سلبًا على الملاحة والإضاءة وأنظمة التشغيل الأخرى [2].

أن تطبيق نظام الطاقة الكهربائية البحرية يختلف اختلافاً كبيراً عن نظام الطاقة الأرضية هذه الورقة تقارن خصائص الأداء والتكلفة والتطبيقات بين الشبكات الأرضية والشبكات البحرية [3]، نظراً لطابعه، أي نظام طاقة معزول، حيث تكون سعة الحمولات الكبيرة للسفينة مماثلة لقدرة محطة توليد الطاقة الخاصة بالسفينة. أيضاً، تُستخدم الأجهزة الإلكترونية للطاقة عموماً في أنظمة السفن وتسبب تشويهاً للتيار، وبالتالي أشكال موجة الجهد. مع الأخذ في الاعتبار مدى تعقيد المسألة المدروسة، فهذا يعني أنه يجب مراعاة مدى اختلاف الحمل والتغير في التردد وأنواع كثيرة من الاضطرابات المصاحبة للتيار والجهد. في الوقت نفسه التقليل من التوافقيات.

2. التوافقيات والمرشحات الفعالة

التوافقيات (harmonics) هي ترددات غير موجودة في الشكل الموجي المثالي (الجيبى) للتيار الكهربائي، تنشأ هذه الترددات عندما تقوم الأجهزة الكهربائية بتحويل التيار من شكل جيبى إلى أشكال أخرى، تحدث في الأنظمة الكهربائية عند استخدام أجهزة غير خطية. تؤثر هذه الظاهرة بشكل كبير على أداء الشبكات الكهربائية البحرية.

تعتبر الأجهزة غير الخطية، مثل المحركات الكهربائية والمقومات (Rectifiers)، من المصادر الرئيسية للتوافقيات. هذه الأجهزة تأخذ الطاقة من الشبكة بطريقة تجعل شكل الموجة الناتج عن استهلاك الطاقة غير متناسق، مما يؤدي إلى توليد ترددات إضافية، زيادة محتوى التوافقيات في الشكل الموجي. بحيث يبلغ التحميل غير الخطي في السفن التجارية والبحرية الحالية 80% من قدرة التوليد على متن السفينة [4]. إن تأثير التشوه التوافقي على المعدات معروف جيداً في [5]، تؤثر الذبذبات التوافقية على الشبكات الكهربائية البحرية بعدة طرق:

زيادة الحرارة: التوافقيات تؤدي إلى توليد حرارة إضافية في الموصلات والمكونات الكهربائية، مما قد يزيد من خطر الأعطال.

تخفيض الكفاءة: تؤدي إلى فقدان الطاقة، مما يقلل من كفاءة النظام الكهربائي ويزيد من تكاليف التشغيل. تدهور الأداء: الأجهزة الحساسة مثل أنظمة التحكم قد تواجه صعوبات في الأداء نتيجة للتداخل الحاصل. تأثيرات على الحماية: التوافقيات يمكن أن تؤثر على استجابة أنظمة الحماية، مما يزيد من خطر الأعطال.

3. حدود التشوه التوافقي للجهد وفقا للمعايير الدولية (Total Harmonic Distortion) THD

تحدد المنظمات الدولية مثل المنظمة البحرية الدولية (IMO) وجمعيات التصنيف البحرية مثل DNV وLloyd's Register حدود التشوه التوافقي للجهد في الشبكات الكهربائية البحرية. وفقاً لمعيار IEC 61000-3-2 وتوصيات IEEE 519، يُفضل أن لا يتجاوز التشوه التوافقي الكلي للجهد 5% THD للأحمال الأقل من 120 فولت و3% للأحمال الأعلى. يُستحسن أن تكون النسبة أقل من 3% لضمان عدم تأثيرها على الأجهزة الحساسة، مع مراعاة القياسات تحت ظروف الحمل الكامل، الحمل الجزئي، وأثناء بدء وإيقاف المحركات. يلخص الجدول 1 حدود التشوه التوافقي للجهد في جميع ظروف التشغيل للتركيبات الكهربائية على متن السفن للمنظمات الدولية وجمعيات التصنيف البحرية [6].

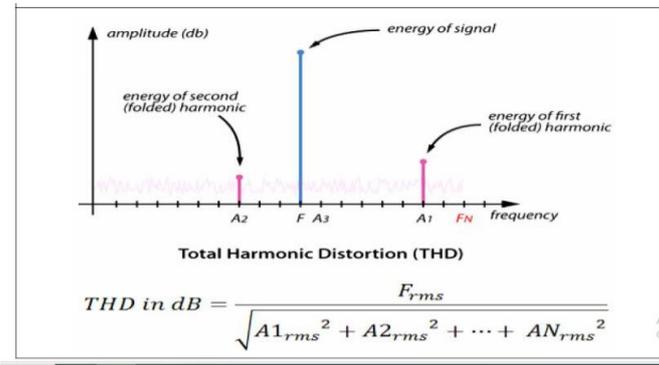
الجدول (1) حدود التشوه التوافقي للجهد

	IEC	IEEE	DNV	ABS	LRS
Total harmonic distortion	5%	5%	5%	5%	5%
Single harmonic	3%	3%	3%	3%	1.5%

من بين الحلول التقنية المستخدمة لمواجهة تأثيرات الحمل غير الخطي هي المرشحات الفعالة والمرشحات الغير فعالة، إلا أن خوارزميات التحكم بالأولى يتم تطويرها باستمرار في عام 1927، قدم فريزيه اعتراضاً على تعريف بودان للقدرة في النطاق الترددي [7]، حيث وضع أساساً لتعريف القدرة من خلال تقسيم موجة التيار والجهد إلى مركبات متعامدة. تعتمد العديد من الحسابات الحالية للقدرة الفعالة وغير الفعالة في المجال الزمني للأنظمة أحادية الطور بشكل أساسي على طريقة فريزيه. من بين النظريات الحديثة المستندة إلى ذلك هي نظرية CPC لتشارنيتسكي [8]، التي تتضمن إمكانية الترشيح الغير فعال جزئياً لمحتوى التوافقيات العليا.

4. مرشحات التوافقيات

يمكن تقليل التشوه التوافقي بكفاءة باستخدام مرشحات غير فعالة الشكل (1)، والتي تتكون من سلسلة من المكثفات والمحاثات مضبوطة لنتناسب مع تردد توافقي محدد. تتمتع هذه المرشحات بممانعة منخفضة للتوافقيات مع ممانعة صفرية عند تردد الضبط. الهدف الرئيسي من هذه المرشحات هو الحفاظ على معامل التشوه الهرموني الكلي (THD) بمستوى أقل من 5% للحصول على أقصى فائدة من المرشحات [9].



شكل (1) التشوه التوافقي واستخدام مرشحات غير فعالة لتقليله

1.4 المرشحات غير الفعالة

المرشحات غير الفعالة هي نوع من مرشحات التوافقيات التي تتطلب فقط عناصر غير فعالة لتكوينها. تعتمد على ترتيب خطي من العناصر مثل المقاومات والمكثفات والمحاثات. تتمتع المرشحات غير الفعالة بالعديد من المزايا مقارنةً بالمرشحات الفعالة، مثل ضمان الاستقرار، وعدم استهلاك الطاقة، وانخفاض التكلفة، وكونها تقليدية. من حيث التحكم في التوافقيات، الورقة [10] أثبتت المرشحات غير الفعالة فعاليتها بشكل كبير.

تتمثل إحدى عيوب المرشح غير الفعال في عدم قدرته على العمل مع مصادر غير جيبيية، مما يستدعي اقتراح تصميم نموذج لدائرة عاكس جهدي (Orthogonal Vectors Based OVT (Topology) مع مرشح غير فعال وربطه بشبكة كهربائية لسفينة باستخدام برنامج محاكاة MATLAB/Simulink، لتجاوز هذه المشكلة وتحليل الأداء.

5. العواكس الجهدية

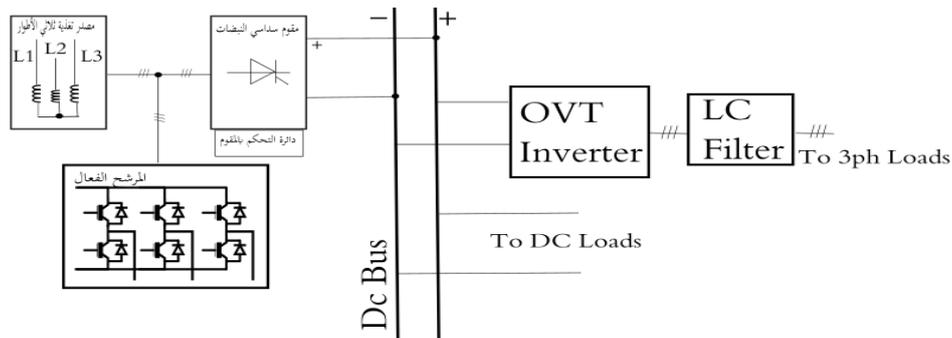
محسّنات الجهد في الشبكات الكهربائية البحرية تعتبر أساسية لتحسين شكل موجة جهد الخرج في التطبيقات التي تكون فيها حاجة لموجة جهدية شبيهة بالجيبيية؛ بتعبير أكثر دقة تحسين قيمة THD

، أي التقليل من إحتواء التوافقيات العليا في الطيف الترددي للموجة الجهدية على مخرج العاكس الجهدية. العاكس OVT تم تقديمه في الأوراق البحثية [11][12][13] تم مقارنة العاكس OVT مع أنواع أخرى الأول عاكس عديد المستويات ذي محول، حيث العاكس OVT هو عاكس بمحول. وكذلك تم مقارنته بالعاكس IHC ذي السبع مستويات لأن العاكس OVT هو أيضاً يمتلك سبع مستويات جهدية. في الورقة [14] تم تقليل التراوح الجهدية من 9% إلى 2% وتراوح التردد من 15% إلى 1%

6. الشبكة المقترحة

شبكة القوى الكهربائية المقترحة في هذه الورقة البحثية تعتمد على استخدام مصدر أولي كمولدات الديزل، أو خلايا كهربائية وقودية، أو بطاريات كهربائية أو غيره، ثم ربطها مع بعض في منظومة تيار ثابت، والتي يتم من خلالها التوزيع على منظومات الشبكة للقطعة البحرية. عند نقاط التوزيع في الشبكة كهربائية يتم استخدام عواكس جهدية كمبدلات نوع DC/AC Converters في هذه الشبكة اقترحنا استخدام العواكس الجهدية بتقنية المتجهات المتعامدة بشكلها المبسط ولكن ايضا يمكن استخدامها بطريقه تكرار Recursive method.

في هذه الورقة تم استخدام تقنية المتجهات المتعامدة بشكلها المبسط مع استخدام مرشحات غير فعالة نوع LC. الحل المقترح يمكن من عملية نقل القدرة بمعامل كفاءة كبير مقارنة بالشبكات التقليدية نظراً لاستخدام شبكة التيار الثابت، وكذلك يقلل من عمل حدوث الاضطرابات وخصوصا في التردد للموجة الجهدية نظراً لاستخدام العواكس الجهدية كمنظومات قدرة الكترونية، ويسهل كذلك من عمليه التزامن وتوزيع الحملات. المخطط العام للمقترح مبين على الشكل 2.

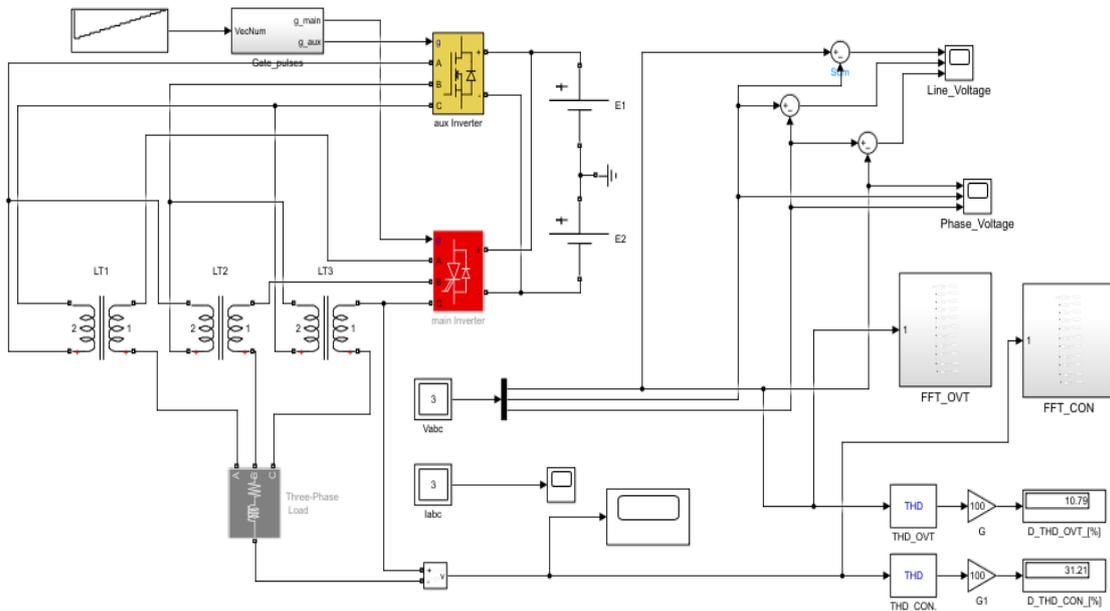


شكل (2) المخطط العام للمقترح لشبكة القوى.

7. التجارب التشبيهية

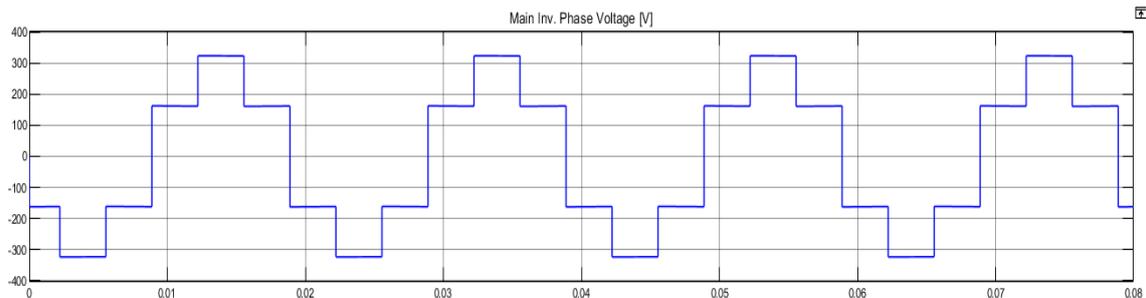
في هذه الدراسة، يتم فحص وتصميم المتجهات المتعامدة مع استخدام مرشحات غير فعالة نوع LC باستخدام برنامج MATLAB / Simulink. وربطه بشبكة تكافئ شبكة كهربائية لسفينة .

1.7 بدون استخدام المرشح الغير فعال

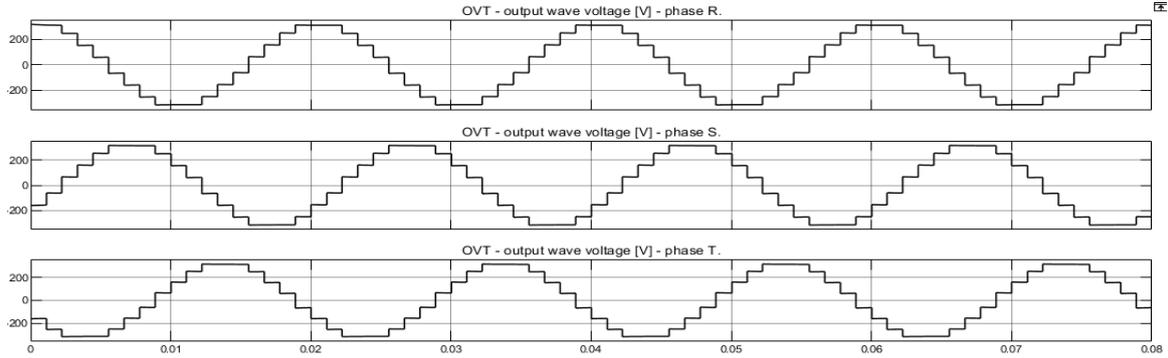


شكل (3) مخطط لعاكس جهدي يغذي حملاً مادياً حتى بدون مرشح غير فعال

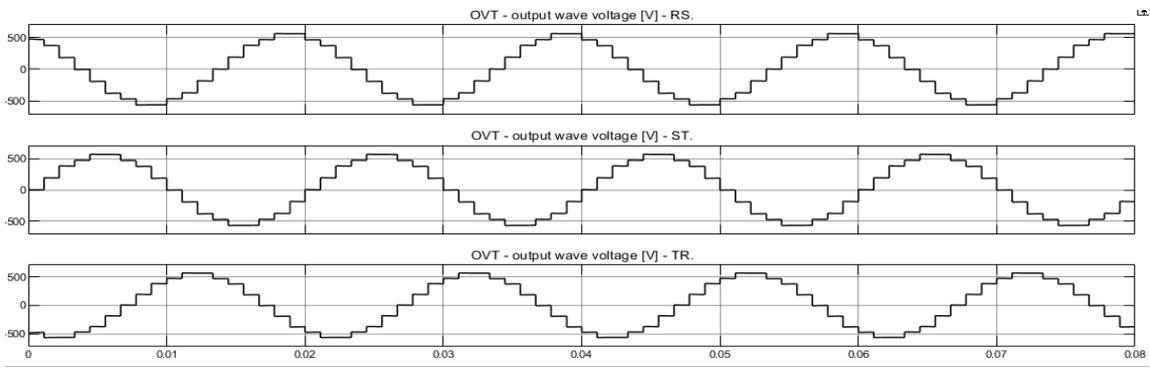
شكل 4 يبين منحنيات الموجات الجهدية للجهد الطوري على خرج العاكس ثنائي المستويات تظهر كموجة مربعة تتراوح بين مستويين، مستوى عالٍ (+V) ومستوى منخفض (-V) تتغير الموجة بين هذين المستويين بتردد معين، مع تحديد نقاط التحول الزمنية. يتم رسم المحور السيني للزمن والمحور الصادي للجهد لتمثيل هذا التغير.



شكل (4) منحنيات الموجات الجهدية للجهد الطوري على خرج العاكس الرئيسي ثنائي المستويات

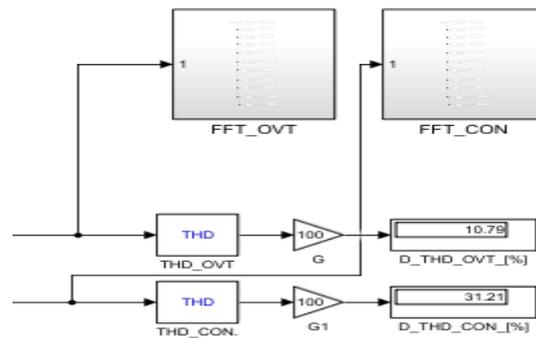


شكل (5) منحيات الموجات الجهدية للجهد الطوري على خرج OVT



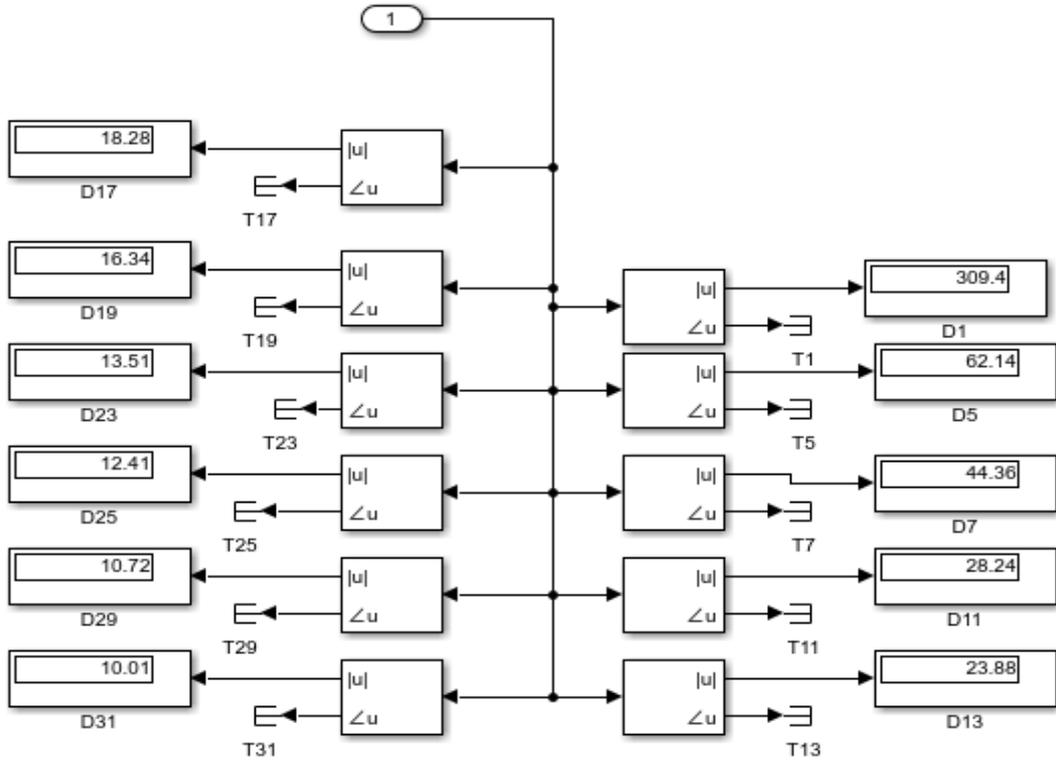
شكل (6) منحيات الموجات الجهدية للجهد الخطي على خرج OVT

شكل 7 تظهر قيم معامل التشوه الهرموني THD بدون ومع استخدام المتجهات المتعامدة بشكل منفصل. عند استخدام المتجهات المتعامدة، يتم انقاصه من 31.21% الي 10.79%.

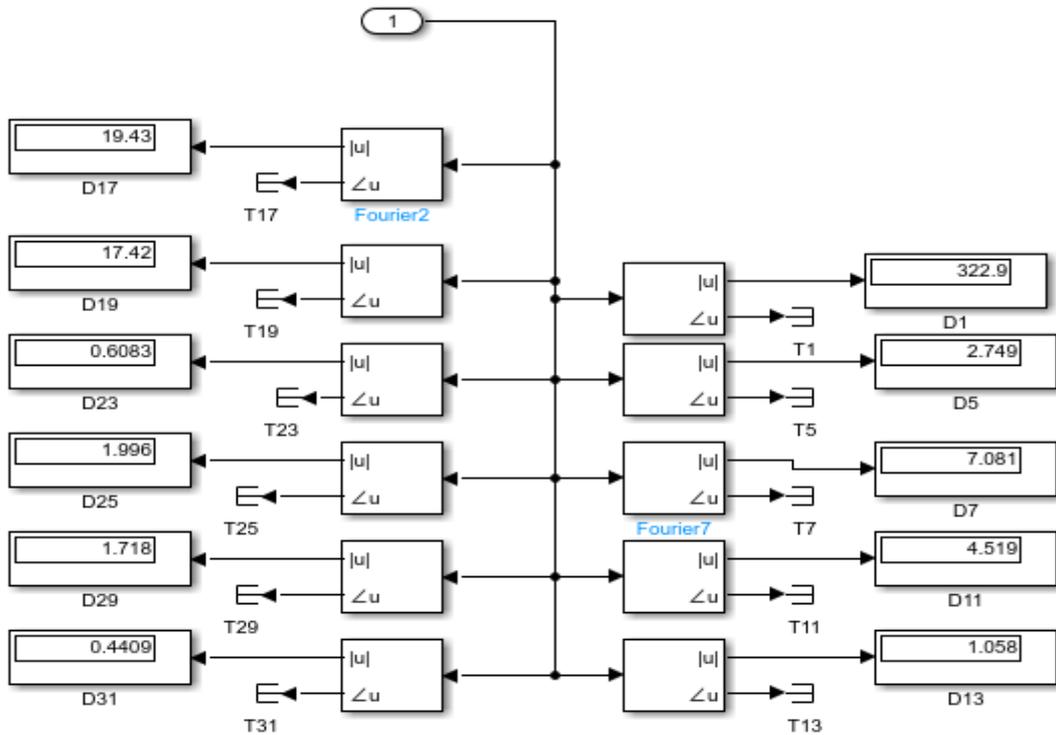


شكل (7) قيم معامل التشوه الهرموني بدون ومع استخدام المتجهات المتعامدة (شكل 4،5)

شكل 8 تمثل قيم مطال التوافقيات العليا الناتجة عن الإشارة الأساسية في الشكل 3 نسبة الطاقة المفقودة. يتم حساب المطال لكل توافقي لعرض تأثيره على الإشارة كما هو موضح نجد ان التوافقية السابعة عشر D17 قيمتها 18.28 والتوافقية التاسعة عشر D19 قيمتها 16.34.



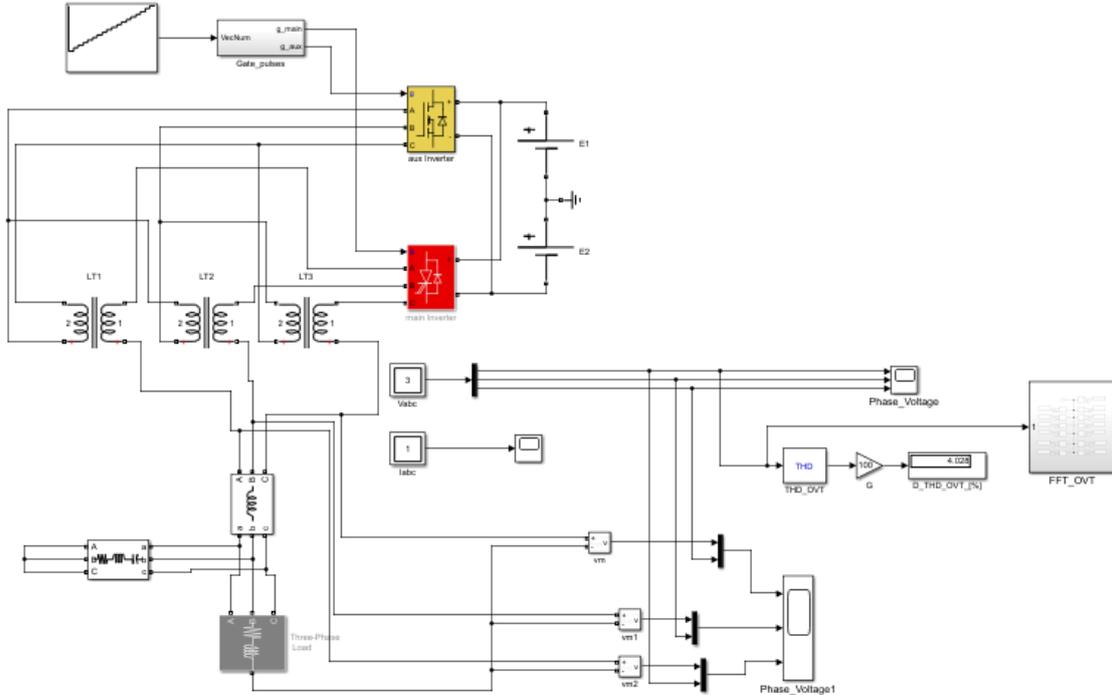
شكل (8) قيم مطال التوافقيات (الهرمونييات) العليا للمنحى من الشكل 4



شكل (9) قيم مطال التوافقيات (الهرمونييات) العليا للمنحى من الشكل 5

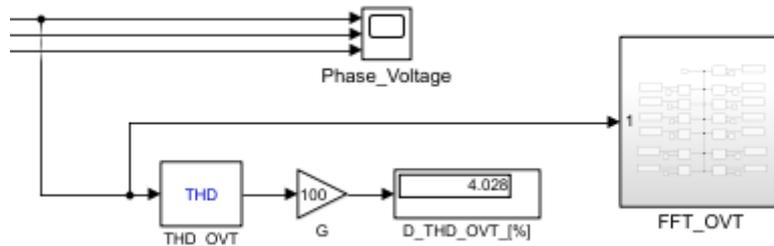
2.7 مع استخدام المرشح الغير فعال

شكل 10 يبين دائرة القوي لعاكس جهدي يغذي حملاً مادياً حتى مع توصيل المرشح الفعال.



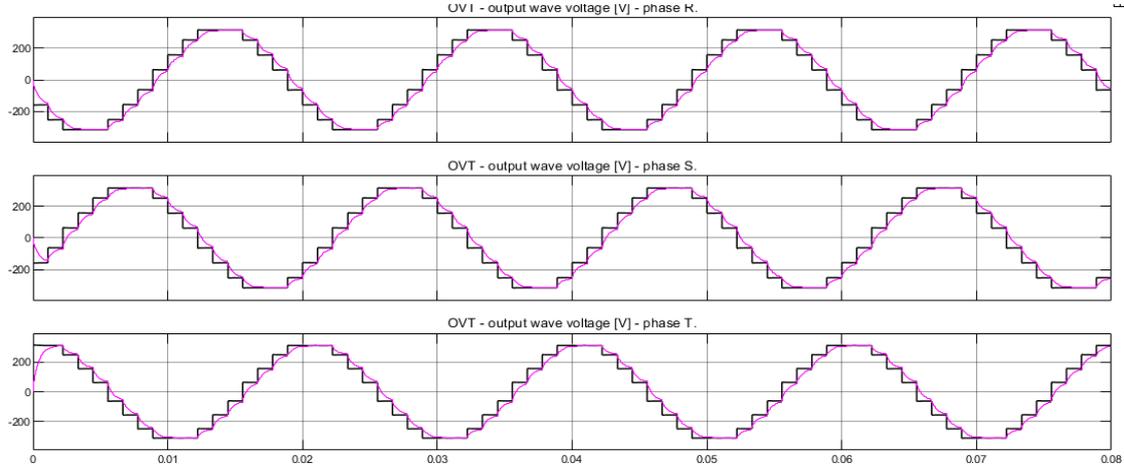
شكل (10) دائرة القوي بعد استخدام المصفي الغير فعال

شكل 11 يبين انخفاض معامل التشوه الهرموني من 10% إلى 4% بعد استخدام المرشح غير الفعال، مما يدل على تحسین الأداء. استخدام المتجهات المتعامدة ساعد في فصل التوافقيات بدقة.



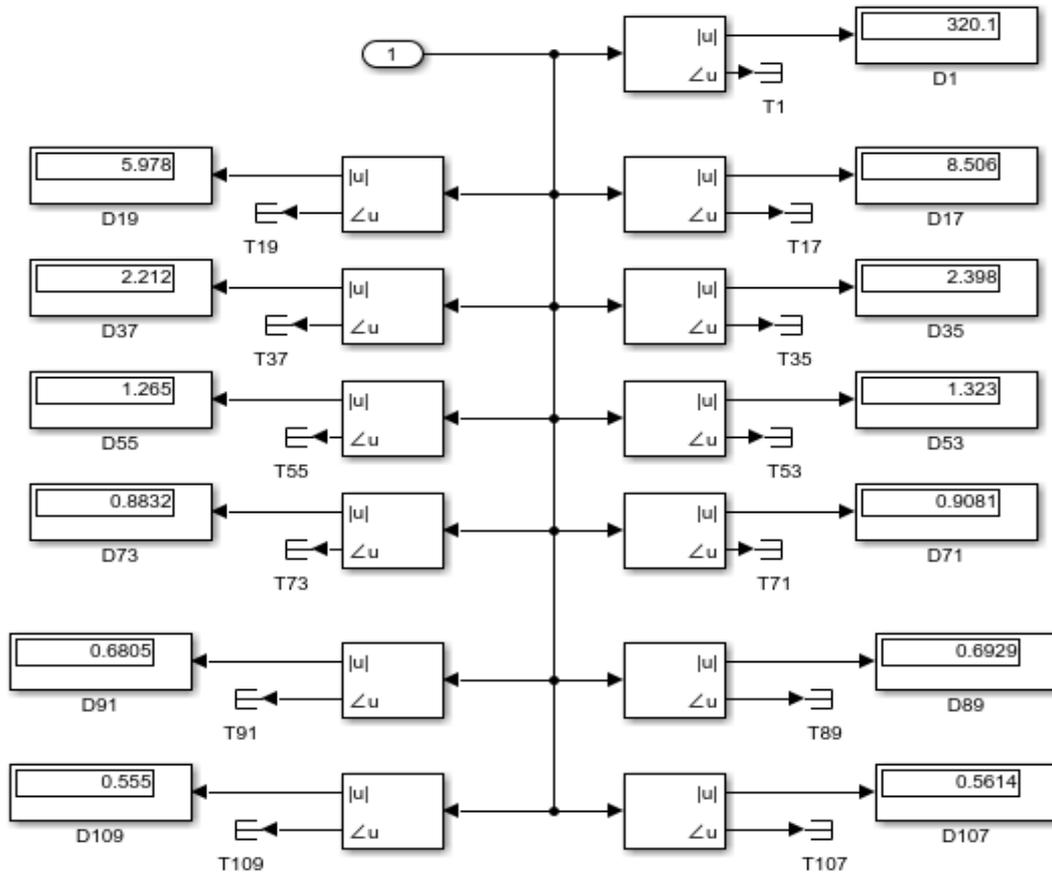
شكل (11) قيم معامل التشوه الهرموني باستخدام المتجهات المتعامدة مع توصيل المرشح الغير فعال

شكل 12 يوضح منحنى الموجة الجهدية على خرج العاكس OVT مع المرشح غير الفعال الذي يظهر تحسیناً في شكل الموجة، مع انخفاض التشوهات وزيادة استقرارها. يعكس ذلك كفاءة أعلى في نقل الطاقة.



شكل(12)منحنى الموجة الجهدية على خرج العاكس OVT مع المرشح الغير فعال

شكل 13 يوضح قيم التوافقيات بعد توصيل المرشح غير الفعال، انخفضت التوافقية السابعة عشر (D17) من 18.28 إلى 8.5، أي بنسبة حوالي 53.55%. كما انخفضت التوافقية التاسعة عشر (D19) من 16.34 إلى 5.978، بنسبة تقارب 63.41%. هذا التحسن يدل على تحسين كبير في الأداء وتقليل التشوهات.



شكل(13) قيم مطال التوافقيات (الهرمونييات) العليا للمنحى من الشكل 11 بعد المصفي

الخلاصة

في هذه الورقة، تم تقديم مقترح لشبكة كهربائية متقدمة للسفن البحرية ذات الدفع الكهربائي، تعتمد على نظام تيار ثابت مع توزيع الجهد بواسطة عواكس جهدية تستخدم تقنية المتجهات المتعامدة، بالإضافة إلى مصفيات جهد من نوع LC. بدأت الدراسة بمقارنة شكل الموجة الجيبية على مخرج العاكس الجهدي بتقنية المتجهات المتعامدة مع شكل الموجة على مخرج العاكس الجهدي ثنائي المستويات التقليدي. وقد أظهرت النتائج اختفاء التوافقيات العليا تقريباً، مع بقاء تلك المصاحبة للمضاعفات مثل التوافقيتين 17 و 19، مما ساهم في خفض معامل التشوه الهرموني (THD) إلى حوالي 10%. وعلاوة على ذلك، تم استخدام مرشح غير فعالة من نوع LC على مخرج العاكس الجهدي، مما حسن شكل الموجة لتصبح عملياً جيبية، وانخفض معامل التشوه الهرموني (THD) إلى حدود 3%، وهي قيمة تتوافق مع المتطلبات المعتمدة من قبل مؤسسات التصنيف البحرية.

المراجع

- [1]Johnson, R. (2016). Development of electric propulsion in maritime transport: The case of SS Turbinia. *Journal of Maritime Engineering*, 12(2), 45-60.
- [2]Prousalidis, J., Styvaktakis, E., Hatzilau, I.K., Kanellos, F., Perros, S., & Sofras, E. (2008). Electric Power Supply Quality in Ship Systems: An Overview. *International Journal of Ocean Systems Management*, 1(1), 68-83.
- [3]Smith, J., Johnson, M., & Lee, S. (2022). Comparison of Terrestrial and Maritime Communication Networks. *Journal of Maritime Communications*, 12(3), 45-67.
- [4] American Bureau of Shipping. Rules for building and classification, Steel Vessels, 2004; part 4, chapter 8.
- [5] Hoevenaars T, Evans Ic, Lawson A. New Marine Harmonic Standards. *Ieee Industry Applications Magazine* 2010:16-25.
- [6] طارق العائب، سالم الشفاط، محمد باتي، "تحسين الأداء في شبكات السفن المضطربة الجزء الأول - دراسة مقارنة"، *المجلة الدولية للعلوم والتقنية*، العدد 27، أكتوبر 2021
- [7] Budeanu C. I.: "Puissances reactives et fictives" Inst. Romain de l'Énergie, Bucharest, 1927.
- [8] Hashad M.: Teoria mocy w obwodach elektrycznych – ortogonalizacja przebiegów. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 2007, nr57 pp 22-35.

[9] Wsiao Y , “Design of Filters for Reducing Harmonic Distortion and Correcting Power Factor in Industrial Distribution Systems”, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 193-199,2001

[10]Koa Gua W J, “Using a Passive Filter to Suppress Harmonic and Resonance Effects on Railway Power Systems”, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 43, No. 4, pp. 25-40, 2014.

[11] Hashad M., Iwaszkiewicz J., A Novel Orthogonal Vectors Based Topology Of Multilevel Inverters, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Special Issue On Multilevel Inverters, 8/2002.

[12] Iwaszkiewicz J., Hashad M: „Converter Control With Help Of Orthogonal Space Vectors – Novel Control Strategy And Novel Topologies”, April 2-5-2002, Pcc-Osaka 2002.

[13] Hartman M., Hashad M., Iwaszkiewicz J.: “Developing Inverter Output Voltage Waveforms With Help Of Orthogonal Space Vectors” – IEEE Conference – Pevd 2000, London.

[14] طارق العائب، سالم العربي الشفاط ، محمد إسماعيل باتي ، " تحسين الأداء في الشبكات "المضطربة"-الجزء الثاني – دراسة تشبيهية" ،المجلة الدولية للعلوم والتقنية، العدد 30، يوليو 2022