مجلة صبراتة للعلوم البحرية والشاملة
Sabratha Journal
for Marine and Total Sciences

عدد خاص بالمؤتمر
العلمي الدولي لتكنولوجيا
علوم البحار
فبراير February 2025

تأثير "جودة الطاقة الكهربائية" على سلامة عمل السفن البحرية

م. محمد منصور دخيل1 ، م. طارق محمد الرابطي 2 ،
م. جمال عشيش3 ، رائد مهندس هانيبال عبد العزيز اللقع4
قسم التقنيات الكهربائية والالكترونية، المعهد العالي للتقنيات الهندسية، طرابلس، ليبيا1,2، 3
رئاسة أركان القوات البحرية4
Mohammed.dakhil@academy.edu.ly1 tariq.alrabiti@academy.edu.ly2
goffran60@gmail.com 3 h2117312@gmail.com 4

ملخص البحث

تقدم هذه الورقة دراسة شاملة لنظام الطاقة الكهربائية في السفن، مسلطة الضوء على الارتباط الوثيق بين جودة الطاقة الكهربائية المستخدمة وخطر وقوع كوارث بحرية. تتناول الورقة المخاطر الكبيرة التي تهدد حياة الإنسان والبيئة الطبيعية، بالإضافة إلى الخسائر الاقتصادية الناجمة عن تدهور جودة الطاقة الكهربائية. تؤكد الورقة على أهمية تقييم وتحسين جودة الطاقة الكهربائية لضمان سلامة وكفاءة عمليات السفن. تشير التحليلات والاختبارات التي أجريت على بعض السفن إلى ضرورة إيجاد حلول شاملة لمشاكل جودة الكهرباء في أنظمة السفن. تتضمن الإجراءات المقترحة منع الاضطرابات الكهرومغناطيسية، تحسين جودة الكهرباء في الأنظمة الفرعية، زيادة مناعة أجهزة الاستقبال، ومراقبة جودة الطاقة في شبكات السفن. تؤكد الورقة على ضرورة أن تكون جودة الكهرباء أولوية في تصميم، تنفيذ، تصنيف، وتشغيل أنظمة طاقة السفن. هذه المسألة تهم جميع الأطراف المعنية مثل مصنعي السفن، أصحابها، المؤسسات المشرفة، ومؤسسات التصنيف البحرية. حل مشكلة جودة الكهرباء يتطلب المعرفة والخبرة المناسبة، بالإضافة إلى البحث عن طرق جديدة للحد من تأثير انخفاض جودة الكهرباء على التشغيل الفعال والآمن للسفن. في الماضي، كانت التشوهات في الجهد الكهربائي لشبكات السفن ناتجة عن عمليات التبديل في المفاتيح الكهربائية وأجهزة الاستقبال، فضلاً عن الجهد الزائد الذي يحدث عند احتراق المنصهرات الكهربائية. أما في الوقت الحالي، فقد أصبحت محولات أشباه الموصلات من نوع AC–DC و DC–AC و DC–DC و AC–AC هي السبب الرئيسي لهذه التشوهات. يمكن قياس THD باستخدام محولات مخصصة لقياس التوافقيات في الجهد والتيار بواسطة الأجهزة الرقمية الحديثة. وكذلك عن طريق أجهزة القياس الذكية التي تستخدم محولات لقياس التوافقيات وتحليلها وربطها

مع منظومات التحكم والمراقبة وتقديم تقارير دقيقة وفورية عن الأداء الكهربائي. حالياً تستعمل عدة خوارزميات متقدمة مثل الأنظمة السحابية التي تستخدم لجمع وتحليل البيانات الكهربائية بشكل مستمر، مما يسهل مراقبة الأداء واتخاذ القرارات السريعة، وبالتالي لتحسين كفاءة استخدام الطاقة وتقليل الطاقة المهدرة على السفن. يمكن قياس هذه التشوهات في شبكات السفن باستخدام مؤشرين رئيسيين: مؤشر تشوه الجهد الكلي (THD) الذي يقيس مدى التشوه في شكل الموجة الكهربائية، ومؤشر الانحراف الأقصى لقيمة الجهد اللحظي الذي يقيس الفرق بين الجهد اللحظي الفعلي والجهد اللحظي المثالي. باختصار، الورقة توضح ضرورة إعطاء الأولوية لجودة الكهرباء في أنظمة السفن وتوفير الحلول المناسبة للتحديات الناجمة عنها لضمان التشغيل الآمن والفعال للسفن.

الكلمات المفتاحية:

الشبكات الكهربائية للسفن، جودة الطاقة الكهربائية، مؤسسات التصنيف البحرية، منظومات القدرة الالكترونية في السفن البحرية، السلامة البحرية، الحرائق في البحر، حوادث الملاحة البحرية.

Abstract:

This paper presents a comprehensive study of the electrical power system in ships, highlighting the close correlation between the quality of the electrical power used and the risk of maritime disasters. The paper addresses significant risks to human life and the natural environment, as well as the economic losses resulting from the degradation of electrical power quality. The paper emphasizes the importance of evaluating and improving the quality of electrical power to ensure the safety and efficiency of ship operations. The analyses and tests conducted on some ships indicate the need for comprehensive solutions to the problem of power quality in ship systems. The proposed measures include preventing electromagnetic disturbances, improving power quality in subsystems, increasing the immunity of receivers, and continuously monitoring power quality in ship networks. The paper stresses the necessity for electrical power quality to be a priority in the design, implementation, classification, and operation of ship power systems. This issue concerns all stakeholders such as ship manufacturers, owners, supervisory institutions, and marine classification societies. Solving the power quality issue requires appropriate knowledge and expertise, in addition to seeking new ways to reduce the impact of low power quality on the effective and safe operation of ships. In the past, voltage distortions in ship networks

were primarily caused by switching operations in electrical switches and receivers, as well as the overvoltage that occurs when electrical fuses burn out. However, in the present, semiconductor converters such as AC-DC, DC-AC, DC-DC, and AC-AC have become the main cause of these distortions. THD can be measured using dedicated transformers for harmonic measurement in voltage and current by modern digital devices. Also, through smart meters that incorporate transformers to measure harmonics and link them with control and monitoring systems to provide accurate and immediate performance reports. Currently, several advanced algorithms are used such as cloud systems that continuously collect and analyze electrical data, making it easier to monitor performance and make quick decisions, thus improving energy efficiency and reducing wasted energy on ships. These distortions in ship networks can be measured using two main indicators: the Total Harmonic Distortion (THD) index, which measures the degree of waveform distortion, and the Maximum Deviation Indicator of the Instantaneous Voltage Value, which measures the difference between the actual instantaneous voltage and the ideal instantaneous voltage. In summary, the paper highlights the necessity of prioritizing electrical power quality in ship systems and providing appropriate solutions to the challenges arising from it to ensure the safe and efficient operation of ships.

Substations, Active filters, Harmonic analysis, Distortion, Control systems, Compressors, Harmonic distortion, active filter, interharmonic distortion, power quality, Marine electrical networks.

1. المقدمة

تعتبر أنظمة طاقة السفن جزء من مجموعة تُعرف بأنظمة الطاقة المستقلة أو "أنظمة الطاقة المعزولة"، والتي تشمل أيضا أنظمة الطائرات، ومنصات الحفر، والجزر الصغيرة، والمصانع الصناعية الموسمية، وأنظمة الطوارئ للبنوك والمستشفيات، ومراكز التسوق ... الخ [1]، وتتميز هذه الأنظمة بالعدد المحدود من مصادر الطاقة، والنسبة العالية من قدرة المستهلك الفردي إلى مصدر الطاقة الكهربائية، بالإضافة إلى القيمة العالية لممانعة قصر الدائرة الخاصة بالمولدات المثبتة في هذه الأنظمة [2].

يجب التأكيد على الاهتمام المتزايد بهذا النوع من الأنظمة حول العالم، والذي يتضح من خلال الأعداد المتزايدة من المنشورات العلمية حوله وكمثال ما يتم نشره على منصات IEEE. تم ذكر هذه

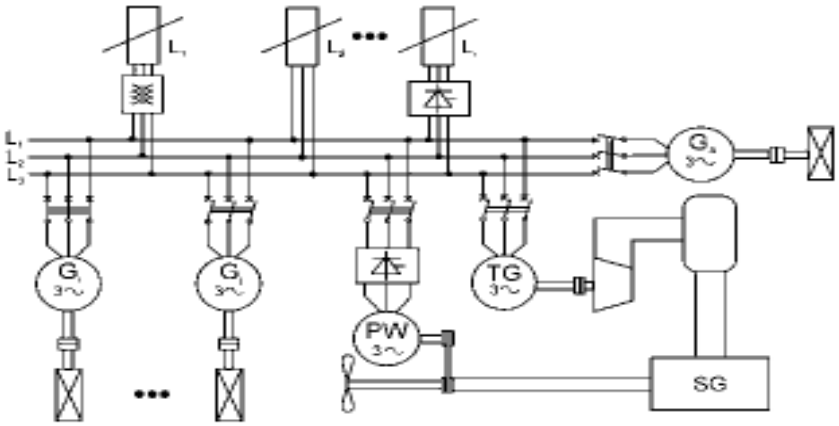
الأنظمة (المعروفة باسم أنظمة الطاقة ذات القصور الذاتي المحدودة) كأحد المجالات الرئيسية التي تهم مجتمع الهندسة الكهربائية حول العالم [3].

ما سبق يجعل أنظمة طاقة السفن تستحق الاهتمام بشكل خاص حيث أنها مثبتة على جسم متحرك في الماء (السفينة)، ولها تأثير حاسم على عملها، وخاصة تلك السفن التي تحمل بضائع خطرة، والتي ستشكل تهديدًا محتملاً للناس والبيئة الطبيعية في حالة فشلها.

2. خصائص نظام الطاقة الكهربائية للسفينة

يتكون نظام الطاقة الكهربائية للسفن من الأجهزة المستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية، وأجهزة نقل وتوزيع للطاقة المُنتَجة، وكذلك مستهلكات الطاقة. فالعناصر الأساسية المكونة لنظام الطاقة الكهربائية للسفن تشمل [3]، [4]:

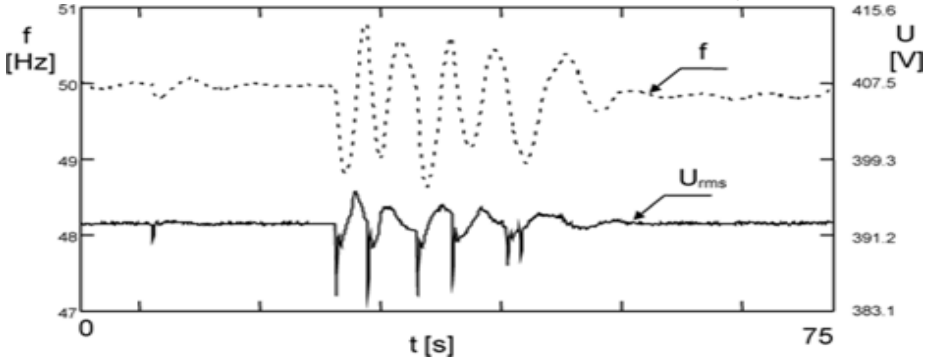
1- مصادر الطاقة: في التكوين الأساسي، عادةً ما يتم استخدام ثلاثة مولدات تعمل بالديزل ومجموعة طوارئ، وأحيانًا يتم تركيب مولدات عمودية أو مولدات توربينية.
2- محطة توزيع رئيسية ، وقواطع، وشبكات رئيسية، وأنظمة قياس.
3- شبكة كابلات.
4- مستهلكات الطاقة الكهربائية.



شكل1 نظام الطاقة الكهربائية ثلاثي الطور للسفن، يُظهر كيفية تغذيته من مصادر طاقة مختلفة [5].

الشكل (1) يوضح مخطط نموذجي لشبكة ثلاثية الطور متنوعة المصادر للسفينة مع مولد عمود الرفاص يغذي الشبكة عن طريق عاكس تياري محكوم (PW)، مدفوع بمحرك رئيسي (SG)، ومولد مدفوع بتوربين (TG)، يتم تغذيته بالبخار المُنتَج في غلاية مُسخَّنة بالغازات العادمة من SG، بالإضافة إلى مولدات (Gi…Gj) ومولد الطوارئ (GA) المدفوعة بمحركات احتياطية تعمل بالديزل.

تعتبر مولدات السفن "مصادر مرنة" للجهد المتناوب، حيث يمكن أن تصل ممانعتها (التي تحددها بشكل رئيسي المعاوقة في المحور الطولي للآلة) إلى 15–20%، مقارنةً بـ "المصادر الصلبة" المستخدمة بشكل شائع في الطاقة الأرضية (4–6%). نتيجة لذلك، تتميز الشبكات الكهربائية للسفن بنسبة منخفضة في القصر الكهربائي، مما يؤدي إلى تيارات قصر كهربائي محدودة وبالتالي لحدوث هبوطات جهدية كبيرة نسبياً مع تراوح في قيمة التردد للشبكة الكهربائية للسفين يصل الى 20% من القيمة الأسمية لتردد الشبكة وهذا غير مقارن تماما مع الشبكات الأرضية "الصلبة" التي فيها هذه القيمة لا تتخطى 1%. الصفة السلبية الأخرى لهذه الشبكات وجود مستهلكات، معظمها محركات غير متزامنة بقدرات مقاربة من قدرات مصادر الطاقة مما يجعل تأثير اقلاع هذه المحركات سيئًا للغاية على عمل المولدات التزامنية. ونظراً لأن المحرك يكون قريبًا من نقطة القصر لقرب المسافات بين المصادر والمستهلكات، ينخفض الجهد عند أطرافه عمليًا إلى الصفر. في هذه الحالة، يعمل المحرك كمولد، حيث يمد نقطة القصر بالطاقة من الاحتياطي الحركي للكتلة الدوارة والطاقة الناتجة عن المجال الكهرومغناطيسي المتلاشي للمحرك. تستمر مساهمة المحركات غير المتزامنة في تيار القصر لعدة دورات وقد تصل إلى 50% من تيار القصر الناتج عن المولدات، وبالتالي فإن التيار الكبير يؤثر بشكل رئيس على القوة الديناميكية للأجهزة مثل القواطع، والمفاتيح، والصمامات. الشكل (2) يوضح مخطط لتغيرات القيمة الفعالة وتردد الجهد الكهربائي خلال بدء تشغيل مراوح حجرة الشحن على السفن من نوع ro–ro [6].



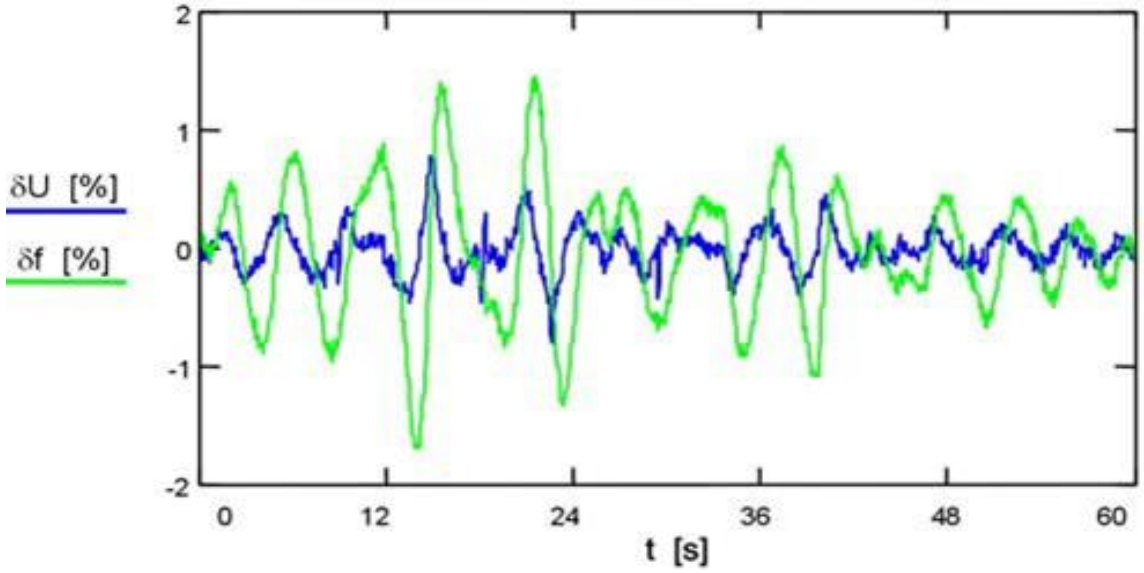
الشكل 2. مسار التغييرات في القيمة الفعالة والتردد على ناقل لوحة المفاتيح الرئيسية للسفينة أثناء بدء تشغيل

خلاصة القول، في حالة حدوث تغيرات في تكوين نظام الطاقة الكهربائية للسفينة الناتجة عن تشغيل وإيقاف المولدات وأجهزة الاستقبال "غير المستقرة" (غالبًا غير الخطية)، ورغم التشغيل الصحيح لكل

من أنظمة تنظيم جهد المولدات وأنظمة تنظيم سرعة الدوران لمحركات المولدات، فإن التغيرات (التذبذبات) في معايير الشبكة البحرية تكون ملحوظة بوضوح.

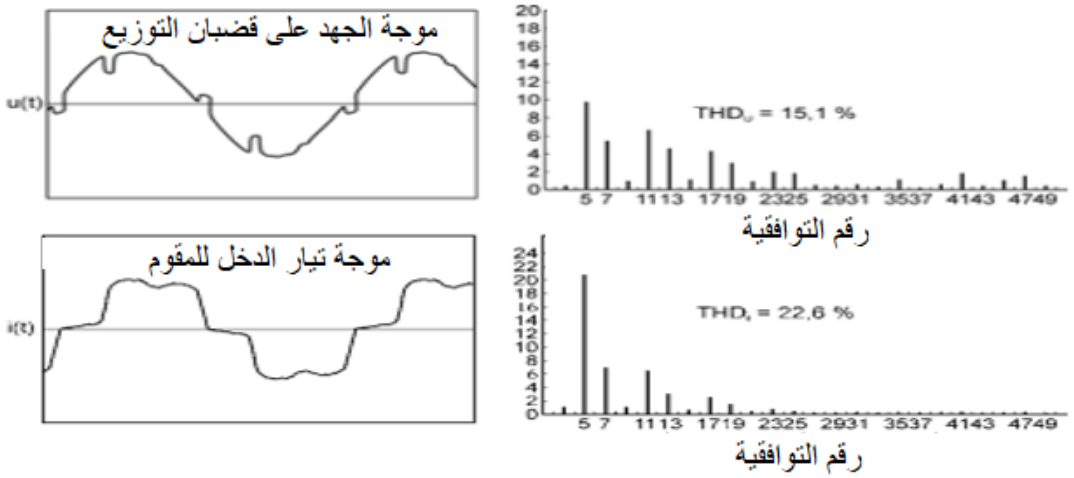
تشكل العوامل البيئية مجموعة منفصلة من العوامل التي تسبب تغييرات في الجهد والتردد في الشبكات الكهربائية البحرية. حيث تتعرض الأجهزة الكهربائية والإلكترونية التي تعمل في البيئة البحرية لظروف خارجية قاسية، مثل: درجات الحرارة المرتفعة والمنخفضة، الضباب الملحي، التغطية بالمياه، الرطوبة العالية، الاهتزازات، الصدمات والتمايلات، و جميع هذه العوامل يمكن أن تؤثر بشكل غير مباشر على جودة الطاقة الكهربائية.

العامل الذي يؤثر مباشرةً على تغييرات القيمة الفعالة للجهد وتردده في الشبكات قيد التحليل هو حالة البحر، خاصة أثناء تشغيل المولد العمودي (الذي يتغذى على الطاقة الميكانيكية من عمود الرفاص). في حالة الأمواج الكبيرة، يحدث تغير في سرعة دوران المحرك الرئيسي نتيجة لتغيرات في حمولة المحرك. ونتيجة لذلك، تتدهور جودة توليد الطاقة الكهربائية بواسطة المولد العمودي المتصل بالمحرك الرئيسي. الشكل(3) يوضح التغيرات النسبية في القيمة الفعالة وتردد الجهد الكهربائي عن قيمتها المتوسطة خلال رحلة سفينة من نوع ro–ro (حمل المركبات). كانت حالة البحر أثناء القياس تتراوح بين 4 و 5 درجات بوفورت، وكان مسار السفينة موجهًا في الاتجاه المعاكس لرياح الأمواج.



الشكل 3. انحرافات القيمة الفعالة وتردد الجهد عن متوسط قيمته لسفينة "رو–رو" أثناء الإبحار في ظروف ملاحية صعبة [3]

بالإضافة إلى ذلك، تأثير استخدام أجهزة القدرة الإلكترونية في الشبكات الكهربائية للسفن الحديثة. فإن هذه الأجهزة تسبب انحرافات (تشوهات) في أشكال موجات الجهد والتيار (كما هو موضح في الشكل 4)، مما يؤثر على أداء النظام الكهربائي، وكلما كان مصدر الجهد أكثر ليونة (ذو مقاومة أعلى)، زاد تشويه الجهد الناتج عن التيار المشوه .[7]



الشكل 4. أمثلة على أشكال موجات الجهد u(t) على قضبان التوصيل الرئيسية وتيار المولد i(t) مع أطياف التوافقيات العليا عند تشغيل مقوم سداسي النبضات [7]

نتيجة لذلك، يصبح من الضروري الحد من مستوى المكونات التوافقية الفردية والتي تسبب التشوه التوافقي الكلي للجهد. عن طريق التقنيات الأكثر استخدامًا في هذا المجال من ملفات للتنعيم، ودوائر التقويم متعددة النبضات، ومحولات تحويل الطور، والمرشحات الفعالة.

هناك عنصر آخر مميز لشبكة السفينة ألا هو التشغيل المتوازي لمجموعتي توليد على الأقل خلال فترات الطلب المتزايد المتوقع على الطاقة، مثل المناورات وأعمال إعادة التحميل بمعدات السفينة. هذا يتطلب تنظيم توزيع الطاقة النشطة والمتفاعلة بين المولدات المتعاونة. قد يتسبب التوزيع غير المتناسب للطاقة في حدوث حمل زائد واضح على محطة توليد الكهرباء الخاصة بالسفينة، مما يؤدي إلى فصل الأحمال الأقل أهمية أو حتى انقطاع التيار الكهربائي في شبكة كهرباء السفينة، وهو ما يسمى "انقطاع التيار الكهربائي "، وله عواقب يصعب التنبؤ بها، خاصة في الظروف الجوية الصعبة. إن حدوث الظواهر والظروف المذكورة أعلاه له تأثير كبير على جودة الكهرباء في شبكات السفن.

3. جودة الكهرباء في أنظمة السفن في ضوء أنظمة جمعيات التصنيف

يمكن تحديد جودة الكهرباء في نظام طاقة السفينة من خلال مجموعة من العوامل التي تصف عملية توليد وتوزيع واستخدام الكهرباء في جميع الحالات التشغيلية للسفينة (المناورات، الرحلة البحرية، البقاء في الميناء) [4]، [6]. و تتضمن هذه المجموعة معاملات الجهد والتيار (القيمة الفعالة، التردد، عدم التماثل، شكل المسار الزمني) في جميع نقاط النظام الذي تم تحليله وتتضمن المعاملات التي تصف خطر فقدان استمرارية إمداد الطاقة (توزيع الأحمال النشطة والمتفاعلة بين مجموعات التوليد العاملة بالتوازي). وجودة الكهرباء المحددة بهذه الطريقة هي مفهوم يغطي أفقًا زمنيًا واسعًا، يساوي وقت تشغيل السفينة، ومنطقة مكانية كبيرة نسبيًا، من سطح السفينة، غرف الطاقم والركاب، غرفة المحرك وعنبر البضائع.

يتم تحديد جودة الكهرباء في شبكة الطاقة الخاصة بالسفينة من خلال جودة إنتاج الطاقة من خلال مجموعات التوليد وجودة استخدامها بواسطة أجهزة استقبال الكهرباء. وعلى الرغم من أن هاتين المسألتين مرتبطتان ارتباطًا وثيقًا، فإن التمييز فيما يتعلق بجودة توليد الكهرباء واستخدامها على متن السفن له أيضًا بعد تشريعي. على سبيل المثال، قواعد تصنيف وبناء السفن، وفقا لـ PRS بشكل مفصل يحدد دقة تنظيم الجهد والتردد في حالات التغيرات الديناميكية لمجموعات التوليد جنبًا إلى جنب مع أنظمة التحكم في السرعة والجهد (توليد الكهرباء) والتي تحدد بشكل منفصل عن القيم المسموح بها لانحرافات الجهد والتردد عن القيمة المقدرة في شبكة طاقة السفينة بسبب التشغيل الصحيح لأجهزة الاستقبال (استخدام الكهرباء) [9]، [10]. وفقًا للوائح PRS ، يجب أن يضمن منظم جهد المولد الحفاظ على الجهد في الحالة المستقرة بدقة تبلغ ±2.5% (عند عامل الطاقة المقدر). ومع ذلك، يجب أن تعمل أجهزة استقبال الكهرباء المثبتة في الأنظمة بشكل صحيح لفترات طويلة من زمن انحرافات الجهد عن القيمة المقدرة +6% −10%. يجب أن يكون أول المتطلبات المذكورة أعلاه أكثر صرامة بسبب الظروف الموصوفة سابقا والناتجة عن خصوصية أنظمة الطاقة في السفن، مما يسبب تدهور جودة الطاقة المولدة بسبب تأثير أحمال الشبكة غير الخطية وغير المستقرة. على سبيل المثال، في حين أنه يمكن تحديد لحظة حدوث الاضطرابات المتعلقة بتشغيل مضخات الدوران أو الدفاعات أو الرافعات الموجودة على متن السفينة بدقة تامة، فإن لحظات تشغيل

وإيقاف الأجهزة التي تعمل في دورات أوتوماتيكية، كالثلاجات أو الضواغط أو المضخات يصعب تحديدها لأنها تنتج عن ظروف تشغيل متغيرة.

تنتج انحرافات الجهد الإضافية في شبكة طاقة السفينة عن انخفاض الجهد على كابلات الطاقة، والتي وفقًا لمتطلبات PRS يجب ألا تتجاوز القيمة نسبة محددة من الجهد المقنن. على سبيل المثال، بالنسبة للكابلات التي تعمل على تشغيل محركات التيار المتردد ذات التشغيل المباشر، تصل النسبة إلى 25% عند بدء التشغيل..[9]

ومن الجدير بالذكر أيضًا متطلبات التوافق الكهرومغناطيسي للأجهزة الكهربائية والإلكترونية المثبتة في شبكات طاقة السفن، والتي، وفقًا للمعايير ذات الصلة [10]، يجب أن تكون مقاومة لاضطرابات نبضات النانو ثانية، واضطرابات نبضات الطاقة العالية، واضطرابات النبضات العالية والمنخفضة، و اضطرابات التردد. علاوة على ذلك، لا يمكن للأجهزة أن تكون مصدرًا لانبعاث اضطرابات مشعة وموصلة بمعاملات تتجاوز القيم الحديثة المشار إليها في اللوائح المذكورة أعلاه. فجودة توليد الكهرباء في شبكة طاقة السفينة تتعلق في المقام الأول بضمان موثوقية (استمرارية) تزويد القضبان الرئيسية لمحطة توليد الكهرباء بالسفينة بالجهد مع المعاملات المناسبة. والذي يعتمد بشكل أساسي على نوع وحدات تشغيل المولدات وخصائص أجهزة تنظيم جهد مولدات السفن وتنظيم سرعة دوران محركات الدفع، وكذلك على خصائص محولات الطاقة الإلكترونية المستخدمة في أنظمة إمداد الطاقة للأنظمة المدروسة.

ويمكن وصف انحراف الجهد والتردد عن قيمهما المقدرة، بشكل منفصل للحالات الساكنة والديناميكية، ببساطة في الوحدات النسبية [8]، [10]، :

$$\delta U = \frac{U - U_n}{U_n} .100 \ [\%] \qquad (1)$$

$$\delta f = \frac{f - f_n}{f_n} .100 \quad [\%] \qquad (2)$$

حيث: U,f - قيم الجهد والتردد الموجودة حاليًا عند النقطة المدروسة في النظام U_n , f_n - تقييمات الجهد والتردد.

وفقًا لمتطلبات PRS و IEC 60092-101:2001 يجب أن تولد مولدات السفن ذات التيار المتردد ثلاثي الطور جهدًا متماثلًا جيبيًا عمليًا ، أي الفرق بين القيمة اللحظية لجهد المولد يجب ألا تتجاوز منحنى الجهد والقيمة المناسبة للمدرج الأول 5% من قيمة الذروة للمدرج الأول ، وعدم

تناسق الجهد الخطي بشكل مستمر القيمة 3%. ومع ذلك أثناء التشغيل، قد يحدث عدم تناسق الفولتية الطورية لمولدات السفن بسبب الحمل غير المتوازن أو طبيعة التصميم، وقد لوحظت هذه الظاهرة عدة مرات أثناء تشغيل السفينة [3]، [4].

إن الحاجة المذكورة سابقًا لتنظيم توزيع القدرة الفعالة والقدرة الردية بين مجموعات التوليد التي تعمل بالتوازي محددة أيضًا في متطلبات لوائح PRS، بناءً على مؤشرات محددة بشكل مناسب لتوزيع الطاقة النشطة i–tej لمولد δp_i وقوتها التفاعلية δQ_i، تعمل بالتوازي؛

$$\delta P_i = \frac{P_i - \alpha_i . \sum_{i=1}^{k} P_i}{P_n} .100 \ [\%] \quad (3)$$

$$\delta Q_i = \frac{Q_i - \alpha_i . \sum_{i=1}^{k} Q_i}{Q_n} .100 \ [\%] \quad (4)$$

حيث: P_i، Q_i، القدرة الفعالة والردية للمولد رقم i، P_n ، Q_n القدرات الأسمية للمولد، أو الحمل النشط أو المتفاعل المقدر للمولد المعني، إذا كان الحمل النشط المقدر أقل من 0.6 والحمل التفاعلي أقل من 0.4 من المقدر الحمل النشط أو التفاعلي لأقوى مولد يعمل على التوازي، k عدد المولدات التي تعمل على التواز ي،و α_i معامل التناسب حسب عدد وقوة مجموعات التوليد المتعاونة (α_i =0.5 و k = 2 وقوى متساوية للمولدات المتعاونة مجموعات).

ومع ذلك، ينبغي فهم جودة استخدام الكهرباء على أنها خاصية عدم تداخل أجهزة استقبال الكهرباء مع تشغيل أجهزة الاستقبال الأخرى التي تعمل من نفس شبكة الطاقة، سواء في الحالات المستقرة أو العابرة. ترتبط جودة استخدام الكهرباء في المقام الأول بتماثل الحمل وعدم خطيته. خلاصة القول، إن التأثير السلبي لمستهلكات الطاقة الكهربائية على جودتها في شبكة السفينة يتجلى في المقام الأول في شكل حالات عابرة، وإدخال توافقيات تيار أعلى في الشبكة وعدم تناسق الحمل.

لتقييم عدم توازن جهد الإمداد، يمكن استخدام مؤشر عدم توازن الجهد المئوي C_{va}، والذي يعرف بأنه نسبة أكبر انحراف للجهد U من متوسط قيمة الجهد U_{avg} إلى متوسط قيمة الجهد [30]:

$$C_{va} = \frac{U - U_{avg}}{U_{avg}} .100 \ [\%] \quad (5)$$

الميزة الكبيرة لهذا المؤشر هو سهولة تحديده والإشارة المباشرة إلى الحمل المسموح. وفقًا لنتائج اللجنة

الكهروتقنية الدولية (تقرير *IEC 892/1987*)، يجب أن يكون الحمل على المحرك التعريفي محدودًا اعتمادًا على C_{va} 0.9، إلى 0.75 من الطاقة المقدرة بعامل 3% وإلى من الطاقة المقدرة مع عامل 5% [4]. السبب الرئيسي لتشوهات الجهد في شبكات السفن في الماضي هو عمليات التبديل في المفاتيح الكهربائية وأجهزة الاستقبال، بالإضافة إلى الجهد الزائد عند احتراق الصمامات. اليوم، غالبًا ما يكون سببها محولات أشباه الموصلات شائعة الاستخدام. ويمكن تحديد هذه التشوهات، بالنسبة لشبكات السفن، باستخدام مؤشر تشوه الجهد *THD* ومؤشر الانحراف الأقصى لقيمة الجهد اللحظي من التوافقية الأولى u_w [9].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} U_n^2}}{U\ 1} .100\ [\%] \quad (6)$$

حيث: U_n، القيمة لجهد التوافقية n ، U_1،قيمة الجهد للتوافقية الأساسية .

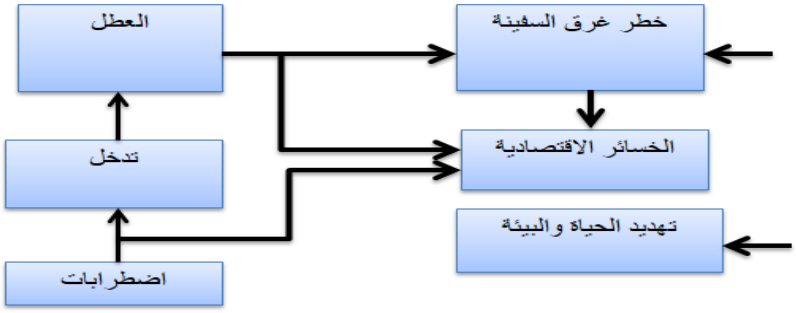
$$u_w = \frac{\Delta U_m}{\sqrt{2}.U_1} .100\ [\%] \quad (7)$$

حيث: ΔU_m- القيمة القصوى للانحراف.

وفقًا للوائح *PRS*، يجب ألا يتجاوز مؤشر تشويه الجهد *THD 10%*، في حين يجب ألا يتجاوز مؤشر الحد الأقصى للانحراف u في قيمة الجهد اللحظي من التوافقي الأول 30%.

4. عواقب انخفاض جودة الكهرباء في أنظمة طاقة السفينة

في شبكات الطاقة الخاصة بالسفن، غالبًا ما نواجه انخفاضًا كبيرًا في جودة الكهرباء بسبب الطيف الواسع من الاضطرابات الكهرومغناطيسية التي تحدث فيها. وتتسبب هذه الاضطرابات في خسائر اقتصادية قابلة للقياس في الأجهزة الكهربائية التي تعمل بالشبكات المعنية، ولكنها تحمل قبل كل شيء خطر تعطيل تشغيل المكونات المهمة لهذه الشبكات (الشكل 5)



الشكل 5. عواقب انخفاض جودة الكهرباء في أنظمة طاقة السفن

تشمل الاضطرابات الأكثر ملاحظة في الأنظمة قيد الدراسة ما سبق ذكره:

التغيرات في قيمة الجهد والتردد،عدم تناسق الجهد،تشوهات منحنى زمن الإشارة الناجمة عن التوافقيات والظواهر "العابرة" و التوزيع غير المتناسب للطاقة النشطة والمتفاعلة بين مجموعات التوليد التي تعمل بالتوازي.

قد تؤدي الاضطرابات في تشغيل العناصر المهمة في نظام الطاقة (المحرك الرئيسي والمولدات وأجهزة الاستقبال ذات الأهمية الحيوية لتشغيل السفينة) إلى فشل يؤدي إلى عواقب اقتصادية خطيرة، ولكنها قد تؤدي أيضًا إلى مجموعة من الظروف (على سبيل المثال. فقدان القدرة على المناورة بالسفينة في حالة الاصطدام)، و يؤدي إلى كارثة بحرية تهدد حياة الإنسان والبيئة الطبيعية. فينبغي إجراء تحليل شامل للأسباب المحتملة للاضطرابات من أجل مواجهتها بفعالية. ومن أهم أسباب الاضطرابات التي تحدث في أنظمة طاقة السفن ما يلي:

- الإهمال في تصميم وتنفيذ النظام ،
- أخطاء في تشغيله (الخطأ البشري، بحسب إحصائيات المنظمة البحرية الدولية، هو السبب الرئيسي للحوادث في البحر)،
- فشل عناصر النظام الهامة (مثل المرشحات التوافقية للعمود) التي تتعاون مع المولدات
- عمليات التبديل والجهد الزائد الناتج في المفاتيح الكهربائية وأجهزة الاستقبال، تأثير الأجهزة الكهربائية المستخدمة.

يستحق السبب الأخير بشكل خاص اهتمامًا أكبر، لأنه بالاشتراك مع "ليونة" الشبكة، فإن محولات الطاقة الإلكترونية المذكورة ذات القدرات المتزايدة بسرعة تسبب تشوهات غير مقبولة في الجهد الكهربي المسجل في شبكات السفن غالبًا ما تتجاوز 15% أو حتى 20% ، وهي تتجاوز بشكل كبير القيم المسموح بها والمحددة في لوائح جمعيات التصنيف (الجدول 1).

يمكن اختزال عواقب انخفاض جودة الكهرباء في شبكات السفن إلى نوعين رئيسيين من التأثيرات: الخسائر الاقتصادية والتهديدات على الحياة والبيئة الطبيعية الناجمة عن تدهور سلامة تشغيل السفن. أما الجانب الثاني من الجوانب المذكورة أعلاه فهو ذو أهمية أساسية، وهو ما ينعكس في إدراج العديد من القضايا المتعلقة بالتشغيل الآمن للأنظمة الفنية للسفينة (بما في ذلك نظام الطاقة الكهربائية) في

الاتفاقيات ذات الصلة المعتمدة تحت رعاية اللجنة البحرية الدولية ، مثل سولاس. وتتعلق هذه الاتفاقيات بسلامة الحياة في البحر، ومنع التلوث البحري الناجم عن السفن، ومتطلبات تدريب البحارة وإصدار الشهادات لهم ومراقبتهم.

يؤثر كل نوع من أنواع الاضطرابات المذكورة سابقًا على السلامة التشغيلية للسفينة، كما أن تأثير التآزر السلبي للاضطرابات لا يخلو من أهمية، وهو ما تم تأكيده تجريبيًا مع الأخذ في الاعتبار حجم المشكلة، فإن أول ما يجب ذكره هو تأثير تدهور معاملات جهد الإمداد على عمل المحركات الكهربائية المثبتة في أنظمة السفن.

وبشكل عام، يتم تشغيل المحركات على جهد مشوه وغير متماثل، مع تردد متغير بشكل كبير ، مما يؤدي إلى جمع أنواع مختلفة من فقدان الطاقة، وانحرافات كبيرة في قيم الجهد والتردد، بالإضافة إلى التشوهات التي تحدث عادةً لمنحنى الجهد وعدم تناسقه، بالإضافة إلى التعرضات المناخية الموجودة في مكان العمل (على سبيل المثال، درجة الحرارة المحيطة المرتفعة غالبًا ما تتجاوز 50 درجة مئوية) ، مما يؤدي إلى انخفاض كبير في متانة هذه الأجهزة. إن العوامل المحيطة، واستحالة الحد من الأحمال في وقت واحد أثناء تشغيل معدات السفن، تفرض الحاجة إلى تطوير أساليب جديدة لاختيار المحركات الكهربائية إلى القدرة المطلوبة، على افتراض التأثير المتزامن للطاقة. العوامل المذكورة أعلاه [3]، [4]،.

انحرافات الجهد تؤثر ايضاً على مصادر الضوء حيث شدة الإضاءة تعتمد على طبيعة هذه الانحرافات ونوع عنصر الضوء المستخدم. تشمل مصادر الضوء الأكثر استخدامًا في السفن المصابيح المتوهجة ومصابيح الفلورسنت [4]. بالنسبة لكلا النوعين من المصادر، فإن تقليل قيمة الجهد يقلل من التدفق الضوئي، مما يضعف سلامة العمل في الغرف المضاءة بالضوء الاصطناعي (محطات توليد الطاقة وورش العمل في السفينة) ويقلل من التدفق الضوئي بشكل عام مما يؤثر على سلامة السفينة وخاصة في ظروف الرؤية المحدودة.

تشوهات منحنى جهد الإمداد هي في الأساس توافقيات عليا وتوافقيات بينية، بالإضافة إلى الاضطرابات النبضية (عابرة وتحت العابرة) واضطرابات النطاق العريض. واعتمادا على طبيعة الاضطراب، فإن لها تأثيرات مختلفة على عمل المصادر وشبكات النقل ومستقبلات الكهرباء. وفيما

يتعلق بمصادر ومستقبلات الطاقة الكهربائية، فإن التأثير المتعلق بسلامة السفن يتجلى بشكل رئيسي من خلال:

- ارتفاع درجة الحرارة والضرر الدائم للمحامل والصفائح المعدنية العازلة ولفات المولدات، الناجمة عن أمور أخرى.
- ارتفاع درجة حرارة الجزء الثابت والدوار في المحركات الكهربائية ذات السرعة الثابتة، وخطر تحمل الضرر اعتمادًا على درجة تسخين الدوار، والزيادات الإضافية في درجة حرارة العزل ، ويحدث خطر خاص في حالة المحركات المقاومة للانفجار التي تعمل في المناطق المعرضة لخطر الانفجار، والتعطل غير المقصود للمفاتيح، وتعطل جميع المعدات الموجودة على متن الأنظمة الكهربائية والإلكترونية وأنظمة التحكم، بما في ذلك أجهزة الكمبيوتر الملاحية، وأجهزة الكمبيوتر الخاصة بالملاحة اللاسلكية، وأجهزة الإضاءة، وما إلى ذلك.

إن الحاجة إلى التشغيل المتوازي لمجموعات التوليد في محطات توليد الطاقة على متن السفن تخلق إمكانية التوزيع غير الصحيح للأحمال بين مجموعات التوليد التي تعمل بالتوازي، والنتيجة قبل كل شيء، حمل زائد واضح.

يؤدي تدهور جودة الكهرباء، بالإضافة إلى تقليل السلامة التشغيلية للسفينة، إلى تكاليف إضافية. مما يقلل جودة الكهرباء المرتبطة بأنواع الاضطرابات المذكورة سابقًا والتي تنتج عن فقدان الطاقة وعمليات التفتيش والإصلاحات المرتبطة بتقليل متانة معدات السفن. علاوة على ذلك، فإن التوزيع غير المتناسب للأحمال بين مجموعات التوليد القائمة بذاتها والتي تعمل بالتوازي له عواقب اقتصادية معينة، مما يؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود. ويرجع ذلك إلى الخاصية غير الخطية التي تربط بين استهلاك الوقود النوعي لمحرك الاحتراق وحمولته[3]، [4].

يمكن تصنيف أي فشل في نظام الطاقة الخاص بالسفينة بسهولة نسبية من حيث مكان حدوثه. ومع ذلك، فإن تقييم أسباب الفشل هو أمر أكثر صعوبة، خاصة إذا كان السبب الفعلي هو تدهور مفاجئ وقصير المدى في جودة الكهرباء. تقوم المنظمة البحرية الدولية بجمع البيانات عن حوادث وكوارث السفن. ويعرض الجدول 1 بيانات عن 120 حالة فشل أو خلل في الأنظمة الكهربائية والإلكترونية، مصنفة حسب مكان حدوثها.

الجدول 1. قائمة أعطال السفن المتعلقة بتشغيل أنظمة الطاقة الخاصة بالسفينة /11/

العطل	رقم حالات	النسبة المئوية
محرك المولد	20	16.7
مولد	16	13.3
شبكة الكهرباء	31	25.8
الأجهزة المساعدة	18	15
أخر	27	22.5
الحريق/ الفيضانات	8	6.7

وبافتراض أن متوسط القدرة لمحطة توليد السفن على مستوى 2 ميجا فولت أمبير ومع الأخذ في الاعتبار العدد المذكور سابقًا وهو 30,395 سفينة، يمكن تقدير الطاقة المركبة في الأسطول التجاري العالمي بحوالي 60,000 ميجاوات. تجدر الإشارة إلى أننا على نطاق كلي في التعامل مع مشكلة الطاقة التي تتجاوز بكثير احتياجات دولة أوروبية متوسطة الحجم. علاوة على ذلك، ينبغي التأكيد بوضوح على أنه في السنوات القليلة الماضية، زادت القدرة المركبة في نظام الطاقة لسفينة واحدة لأنواع مختارة من السفن (سفن الركاب، والناقلات، وكاسحات الجليد) من عدة إلى عشرات ميجاوات، والأعلى من ذلك يصل مستويان أو ثلاثة مستويات من الجهد تصل إلى 10 كيلو فولت. على سبيل المثال، في أحد حلول شركة جنرال إلكتريك [12]، يتكون المحرك الكهربائي الرئيسي في عبّارات الركاب من محركين قدرة كل منهما 19 ميجاوات، كما أن محطة توليد الكهرباء الخاصة بالسفينة مجهزة بخمس مجموعات توليد بقدرة 11.2 ميجاوات [13].

5. تحسين جودة الكهرباء في أنظمة السفن

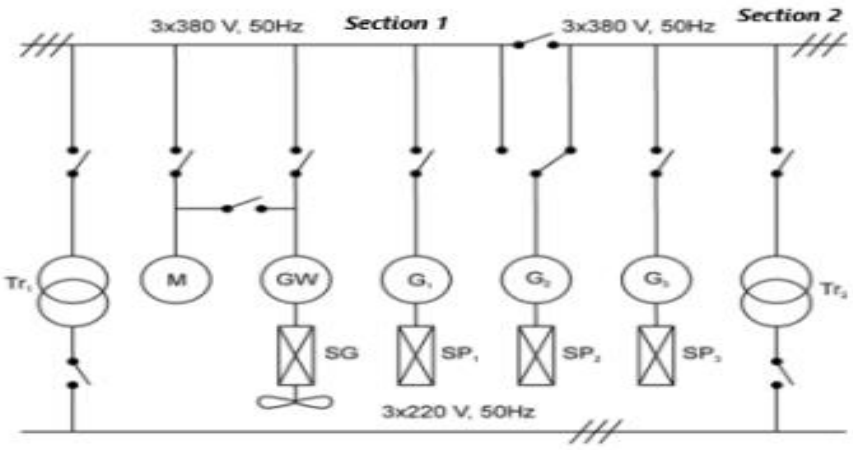
يمكن الحد من التأثير السلبي للاضطرابات في محركات السفن المزودة بأنظمة المحولات من خلال:

- تقسيم نظام طاقة السفينة إلى أنظمة فرعية مستقلة ذات مصادر منفصلة للكهرباء،
- استخدام المحولات الكهروميكانيكية،و ا ستخدام محولات الفصل
- استخدام المرشحات التي تحد من التوافقيات
- استخدام حلول التصميم المختارة، على سبيل المثال محولات القدرة الالكترونية.

تجدر الإشارة إلى أن اتفاقية *SOLAS* توصي بتقسيم قضبان التوصيل الرئيسية لمحطات توليد الطاقة على متن السفن بقدرة أعلى من 3 ميجاوات [*14*]. غالبًا ما يستخدم هذا الحل في حالة

أجهزة الدفع التي تسبب تغيرات كبيرة في الجهد والتردد في النظام قيد النظر.

يظهر الشكل(6) نوع تكوين مجموعة المفاتيح الكهربائية الرئيسية لمحطة توليد الطاقة على متن السفينة



الشكل 6. رسم تخطيطي مثالي للمفاتيح الكهربائية الرئيسية ومحطة توليد الطاقة بالسفينة مع تقسيم قضبان التوصيل بلوحة المفاتيح وإمكانية تشغيل الدافع من نظام فرعي منفصل: محرك الدفع M، مولد عمود GW، G1.2.3 – مولد قائم بذاته، Tr1.2 محول 220/380 فولت، SG – المحرك الرئيسي، SP123 – المحرك المساعد

ومع ذلك، يبدو أنه من المبرر أن يتم استخدامه أيضًا في حالة الأجهزة الأخرى التي تشكل مصادر اضطرابات، مثل محولات القدرة الإلكترونية، وكذلك في حالة أنظمة الطاقة المنخفضة.

فالغرض من تقييم جودة الكهرباء هو الكشف السريع عن التهديدات التي تواجه أداء الأنظمة التقنية للسفن، وكذلك الحد من الآثار الاقتصادية لهذا التدهور. حيث يجب التأكيد على الحاجة إلى مراقبة جودة الطاقة بشكل مستمر، والتي ينبغي أن توفر معلومات تشخيصية مهمة حول النظام، وتحديد حالات فشل مكونات النظام المهمة، مثل منظمات الجهد والتردد والمرشحات التوافقية وأجهزة استقبال الطاقة الكبيرة، بالإضافة إلى اتخاذ التدابير التصحيحية المناسبة قبل حدوث فشل في نظام الطاقة الخاص بالسفينة عند وضع مجموعة من المؤشرات لتقييم جودة الكهرباء في أنظمة طاقة السفن، يجب أخذ ثلاثة معايير في الاعتبار [3]:

- السلامة الفنية وتشغيل أنظمة السفن.
- الكفاءة الاقتصادية لتشغيل الأنظمة التقنية للسفن.
- إمكانية الوصول إلى القياس وسهولة تشغيل أدوات القياس المطلوبة.

6. التحكم في جودة الطاقة في أنظمة السفن

مراقبة الجودة الطاقة يمثل تحديًا يواجه مصممي أنظمة طاقة السفن ومشغليها، أي أطقم السفن. مع الأخذ في الاعتبار الشروط المذكورة سابقًا فيما يتعلق بأسباب وآليات الاضطرابات المتعلقة بمعالجة الطاقة الكهربائية في الأنظمة، وذلك بمراقبة جودة القدرة الفعالة والغير فعالة. فينبغي فهم مفهوم مراقبة جودة الطاقة على أنه استخدام مثل هذا التصميم والحلول التكنولوجية التي تقلل بشكل كبير من تأثير الاضطرابات التي تمت مناقشتها والتي تتضمن استخدام مرشحات (سالبة بشكل أساسي) للحد من التوافقيات العليا. ومع ذلك، يجب التأكيد على إمكانية استخدام المرشحات النشطة أو الهجينة في أنظمة السفن [9].

يوصى بإجراء آخر في هذا الصدد، من بين أمور أخرى: وفقًا لاتفاقية SOLAS [14]، وهو التصميم المناسب للوحة المفاتيح الرئيسية، حيث تكون أجهزة الاستقبال الأكثر حساسية للتغيرات في معاملات الجهد مزودة من مصدر الطاقة بشكل منفصل (مثل أنظمة أمان الأقمار الصناعية GMDSS). يبدو أن هذا التقسيم "المسبق" لمجموعة المفاتيح الكهربائية الرئيسية هو حل أكثر فعالية من الناحية الاقتصادية من توسيع عناصر الحماية، على سبيل المثال المرشحات المعقدة.

ومع ذلك، فإن الشرط الضروري للتحكم في جودة الكهرباء هو معلومات القياسات الكهربائية، والتي يمكن الحصول عليها باستخدام جهاز قياس متعدد المعاملات محللا لجودة الكهرباء. يمكن أن يكون مثل هذا المحلل في نهاية المطاف نظامًا آليًا لمراقبة جودة الطاقة حيث يتم تحويل معلومات القياس حول معاملاته إلى إشارات تتحكم في أنظمة تنظيم الجهد والتردد ومفاتيح مجموعات التوليد الفردية. وبغض النظر عن هذه الوظائف، فإن النظام المقترح سيمارس الإشراف المستمر على تشغيل محطة توليد الكهرباء.

7. الخلاصة

في الورقة تم توضيح المشاكل الفنية الحادثة في نظام الطاقة الكهربائية في السفن التي قد تعرض السلامة للسفن والافراد والملاحة العامة والبيئة للخطر، مسلطًا الضوء على العلاقة الوثيقة بين جودة الطاقة الكهربائية المستخدمة وخطر الكوارث البحرية. كما تم مناقشة المخاطر التي تهدد حياة الإنسان والبيئة، والخسائر الاقتصادية الناتجة عن تدهور جودة الطاقة الكهربائية، مع التأكيد على أهمية تقييم وتحسين جودة الطاقة كأحد الحلول الوقائية التنبؤية (الشرطية).

تشير الدراسات والتحليلات التي أجريت على بعض السفن إلى الحاجة إلى حل شامل لتحسين جودة الكهرباء في أنظمة السفن. الإجراءات المقترحة تشمل منع الاضطرابات الكهرومغناطيسية، تحسين جودة الكهرباء في الأنظمة الفرعية، تعزيز مناعة أجهزة الاستقبال، ومراقبة جودة الطاقة في الشبكات البحرية. تشدد الورقة على أن تكون جودة الكهرباء أولوية في تصميم، تنفيذ، تصنيف، وتشغيل أنظمة طاقة السفن. هذا الأمر يهم مصنعي السفن وأصحابها، والمؤسسات المشرفة، ومؤسسات التصنيف البحرية. يتطلب معالجة هذه المشكلة المعرفة والخبرة المناسبة، والبحث عن أساليب جديدة للحد من تأثير انخفاض جودة الكهرباء على التشغيل الفعال والآمن للسفن.

تاريخياً، كانت التشوهات في الجهد الكهربائي لشبكات السفن ناتجة عن عمليات التبديل والجهد الزائد عند احتراق المنصهرات الكهربائية. في الوقت الحالي، تتسبب محولات أشباه الموصلات المنتشرة بشكل واسع (AC–DC، DC–AC، DC–DC، AC–AC) في التشوهات الرئيسية. تم استخدام مؤشرين رئيسيين لتحديد هذه التشوهات: مؤشر تشوه الجهد الكلي (THD) ومؤشر الانحراف الأقصى لقيمة الجهد اللحظي.

تلخص الورقة عواقب انخفاض جودة الكهرباء في أنظمة طاقة السفن، موضحة أن الاضطرابات الكهرومغناطيسية الواسعة النطاق تسبب خسائر اقتصادية وتعطل المكونات الحيوية. إذا لم تتم مواجهة هذه الاضطرابات، قد تحدث أعطال في تشغيل العناصر المهمة، مثل المحرك الرئيسي والمولدات وأجهزة الاستقبال الحساسة، مما يؤدي إلى فقدان القدرة على المناورة أو حتى كارثة بحرية تهدد حياة الإنسان والبيئة.

تشير الورقة أيضًا إلى ضرورة تطوير أساليب جديدة لاختيار المحركات الكهربائية المناسبة، مع الانتباه للتأثيرات المناخية المحيطة. كما تسلط الضوء على تأثير انحرافات الجهد على مصادر الضوء مثل المصابيح المتوهجة والفلورسنت، وتأثيرها على عمل المصادر وشبكات النقل. توجد العديد من الدراسات الحديثة التي تولي اهتماماً بالغاً حول ارتباط جودة الطاقة الكهربائية بالاتاحة والسلامة والكفاءة في الشبكات البحرية أو الشبكات الأرضية سواء في نطاق وصف هذه الظواهر من ناحية تأثيراتها المحتملة والمدروسة وكذلك في نطاق الوقاية ومعالجتها ماستعمل المرشحات الفعالة ذات خوارزميات معقدة تعمل على تحسين المنحنيات اللحظية للجهد والتيار [15] [16] [17] [18].

8.المراجع

[1] De Abreu J.P., De Sa J.S., Prado C.C., Harmonic voltage distortion in isolated electric systems. 7th International Conference Electrical Power Quality and Utilization", Kraków, 17-19 wrzesień 2003, 469-472.

[2] Dzwonkowski A., Reliability of power supply for selected industrial facilities with seasonal operation, Przegląd Elektrotechniczny, no. 6/2003, 452-456.

[3] Tarasiuk T., Analysis of methods and systems for determining power quality indicators in ship power systems, Doctoral dissertation, Gdańsk University of Technology, Gdańsk 2001.

[4] Mindykowski J., Assessment of the quality of electric power in ship systems with converter systems, Wyd. Okrętownictwo i Żegluga, series Advances in Electric Drive and Power Electronics, volume 44, Electrotechnical Committee of the Polish Academy of Sciences, 2001

[5] Electrical ship equipment [ed.] T. Lipski, WSM Gdynia, 1971

[6] Mindykowski J., Tarasiuk T., Electrical energy quality under ships conditions, XVI IMEKO World Congress, Wiedeń 2000, vol. VII, 245-250

[7] Reinecke H., Schild W., Harmonics in main electric supply systems with semiconductor rectifiers and subsequent methods of compensation, IMECE'91, Shanghai, China, 1991, 1-10

[8] Evans I.C., Driving ahead the progress of electric propulsion, The Motor Ship, September 2003, 28-34

[9] Rules for the Classification and Construction of Sea-going Ships, Polish Register of Shipping, Gdańsk, 1995, supplements 2000

[10] Environmental tests of ship equipment, PRS Regulations, 11/P/2002

[11] Mindykowski J., Assessment and improvement of electric power quality in ship's modern systems, 5th International Marine Electro technology Conference and Exhibition, IMECE 2003, Shanghai, September 2003, invited plenary paper, 8-21

[12] Electric propulsion for a cruise liner, The Naval Architect, January 1997

[13] Stareńczak P.B.: Queen Mary 2. Shipbuilding, No. 1/2004, pp. 19-26

[14] Konwencja SOLAS, Consolidated Edition, International Maritime Organization, London, 1997

[15] S. Rahman, I. A. Khan and M. H. Amini, "A Review on Impact Analysis of Electric Vehicle Charging on Power Distribution Systems," 2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Bangkok, Thailand, 2020, pp. 420-425, doi: 10.1109/SPIES48661.2020.9243118.

[16] Mathematical Model of a Ship Power System with DCPowerDistribution System.

[17] Disturbance Mitigation in Ship Power System with DC Distribution System.

[18] A. V. Vyngra and B. A. Avdeev, "Improving The Power Quality Of A Marine Automated Digital Substation By Using An Active Filter," 2021 4th International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, Russian Federation, 2021, pp. 1-10, doi: 10.1109/RPA53216.2021.9628669.