



KAPITEL 10 / CHAPTER 10¹⁰ METHODS OF CONTROLLING ELECTRICAL ENERGY QUALITY OF SHIP ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-27-00-020

Вступ. Основні параметри, що визначають техніко-економічну ефективність суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) – це рід струму, значення напруги, частота струму. Важливу актуальність набуває сьогодні і якість електричної енергії. На вимогу морського Регістру судноплавства коефіцієнт несинусоїдальності напруги суднової електричної мережі не повинен перевищувати 10%.

Основна частина. На судах [1, 2] дозволяється застосування постійного та змінного струму. Однак досвід експлуатації СЕЕС показав переваги змінного струму, особливо за великих потужностей енергетичних систем.

Порівнюючи складові елементи СЕЕС постійного та змінного струму, необхідно відзначити, що при використанні постійного струму суднові електроприводи відрізняються хорошими регульовальними та пусковими характеристиками; електророзподільні пристрої – меншою масою, габаритними розмірами, вартістю та обсягом.

При використанні в СЕЕС змінного струму для електроприводів в основному застосовуються асинхронні короткозамкнені двигуни, рідше - асинхронні двигуни з фазним ротором та синхронні двигуни.

Асинхронні короткозамкнені двигуни (за відсутності колектора) володіють більшою надійністю, меншою на 30-40%, масою і на 20-30% габаритними розмірами, у 2–3 рази меншою вартістю, мають вищий коефіцієнт корисної дії (ККД) у порівнянні з колекторними двигунами та нижчим рівнем шуму.

Система керування асинхронним двигуном простіше, а отже, він має більшу надійність, менші габаритні розміри, масу та вартість. Слід зазначити складність регулювання частоти обертання в широких межах та значні провали напруги при пуску потужних асинхронних короткозамкнених двигунів.

¹⁰Authors: Doshchenko Halyna Gennadiivna



Слід зазначити, що СЕЕС змінного струму дає можливість:

- перетворити напругу за допомогою трансформаторів;
- розділяти на окремі, електрично не пов'язані один з одним частини (силову та освітлювальну мережу);
- отримувати електроенергію з берега без перетворювачів;
- застосовувати вищу напругу;
- підвищити рівень уніфікації суднового електрообладнання з електрообладнанням загального (берегового) застосування.

Якщо приймачі електроенергії постійного та змінного струму на судні порівняно однакові і за важливістю, і за кількістю (наприклад, судна технічного флоту), питання про вибір роду струму вирішується розглядом варіантів із визначенням економічної ефективності, що очікується від їхнього впровадження.

На деяких судах застосовуються два роди струму, коли гребні електродвигуни живляться постійним струмом, інші приймачі – змінним.

Розміщення суднової електростанції (СЕС) може бути різним. При невеликих потужностях СЕС джерела, перетворювачі та розподільні пристрої станції розміщують у машинному відділенні. Іноді джерела електричної енергії встановлюють у приміщенні, суміжному з машинним відділенням, а розподільний пристрій – поблизу поста управління головними двигунами. Звичайно, найбільш вдалим є розміщення джерел електроенергії в окремому приміщенні, а розподільного пристрою – на центральному посту управління енергетичною установкою.

Оскільки умови роботи суднового електроустаткування загалом відрізняються від загальнопромислових умов, то це визначає такі вимоги: суднове обладнання повинне надійно працювати при тривалому крені до 15° та диференті до 5° , бортовій качці з амплітудою до $22,5^\circ$ з періодом 7-9 с і кильовий - до 10° від вертикалі, підвищеної вологості та температури; при кренах, качках та диферентах апаратура не має мимоволі включатися; рухомі контакти електроустаткування не повинні змінювати комутаційного положення при



бортовій качці з амплітудою до 45°.

При цьому суднові електричні станції мають забезпечувати можливість:

- роздільної та паралельної роботи генераторних агрегатів, електричного захисту генераторів, ГРЩ та приєднаних до них кабельних ліній при виникненні аварійних ситуацій;
- зв'язки з береговими електричними системами та СЕЕС інших суден;
- управління якістю розподілу генерованої електроенергії;
- виконання експлуатаційного спостереження за елементами СЕС та проведення ремонтних робіт.

Відповідно до правил Регістру, номінальна напруга на виводах джерел електроенергії не повинна перевищувати наступних значень: 0,4 кВ (400 В) – за трифазної системи змінного струму; 0,230 кВ (230 В) – за однофазної системи змінного струму; 0,23 кВ (230 В) – при постійному струмі.

Для суден технічного флоту, а також для спеціальних суден допускається застосування трифазної системи напругою до 10 кВ включно.

Слід зазначити, що напруга до 1000 В практично не впливає на масу, габаритні розміри та вартість електричних машин та трансформаторів. Маса, габаритні розміри та вартість електричних апаратів та кабельних ліній електропередачі залежать від напруги та струму, що протікає по них, а отже, і електророзподільні щити, в яких встановлюються електричні апарати мають масу, габаритні розміри та вартість, що залежать від напруги та струму.

Однак слід пам'ятати, що за малої потужності СЕЕС істотну роль починають грати такі фактори, як механічна міцність жили кабелю, дискретність стандартних значень, переріз жил кабелів тощо.

Важливу роль при виборі значення напруги судна має напруга берегових установок, особливо при постійному живленні з берега. Слід також пам'ятати, що підвищення напруги СЕЕС завжди пов'язане зі збільшенням ймовірності ураження електричним струмом, тому в міру зростання напруги СЕЕС має підвищуватись ефективність заходів щодо забезпечення безпеки обслуговування.



Мережі освітлення необхідно відокремлювати від силових мереж.

Основною частотою змінного струму як на суднах, так і в берегових електроустановках прийнято частоту 50 Гц.

На сучасних суднах є група приймачів, частота струму яких дорівнює 400-500 Гц (радіолокаційне, навігаційне та інше обладнання). Їхнє живлення здійснюється від суднової мережі з частотою 50 Гц через перетворювачі, що обертаються та статичні, кількість яких на великих суднах може бути значним. Для таких приймачів іноді доцільно мати систему централізованого постачання електроенергією змінного струму частотою 400-500 Гц.

Дослідження показали [3], що збільшення частоти струму призводить до зниження маси і габаритних розмірів у машин, що обертаються, трансформаторів, магнітних підсилювачів, конденсаторів, елементів електроавтоматики. Однак маса та габаритні розміри комутаційних апаратів при підвищенні частоти струму збільшуються через погіршення умов дуго гасіння, а у зв'язку з цим через підвищення тепловиділень у шино проводах збільшуються маса та габаритні розміри електророзподільних пристроїв.

Підвищення частоти негативно позначається на масі та габаритних розмірах електричних кабелів, так як збільшення частоти призводить до збільшення втрат енергії та електричного опору кабелів.

Якість електричної енергії це сукупність властивостей електричної енергії, які визначають її придатність для суднових електричних приймачів. До показників якості (%) у встановлених режимах роботи судна відносять:

– тривале відхилення напруги ΔU - відносна різниця між фактичним U та номінальним $U_{ном}$ значеннями напруги:

$$\Delta U = [(U - U_{ном}) / U_{ном}] \cdot 100\%$$

– тривале відхилення частоти Δf - відносна різниця між фактичним f та номінальним $f_{ном}$ значеннями частоти:

$$\Delta f = [(f - f_{ном}) / f_{ном}] \cdot 100\%$$



– коефіцієнт k^u не симетрії (не балансу) напруги в 3-фазній системі - відносна різниця між максимальним U_{max} і мінімальним U_{min} значеннями лінійної напруги:

$$k^u = [(U_{max} - U_{min}) / U_{ном}] \cdot 100\%$$

– коефіцієнт k_d спотворення синусоїдальності кривої напруження - відношення квадратного кореня із суми квадратів діючих значень вищих гармонійних складових напруги U_v до чинного значення основної гармонійної складової U_1 :

$$k_d = [\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2} / U_1] \cdot 100\%$$

– коефіцієнт $k_{пульс}$ пульсації напруги постійного струму:

$$k_{пульс} = (U_{\mu} / U_{cp}) \cdot 100\%$$

де U_{μ} – амплітуда нижчої гармоніки змінної складової випрямленої напруги;

U_{cp} – середнє значення випрямленої напруги.

Для однаковості оцінки пульсації напруги при різних її середніх значеннях допускається величину U_{cp} замінювати на $U_{ном}$, а величину $U_{max} + U_{min}$ - на величину $2U_{ном}$.

До показників якості електроенергії у перехідних процесах СЕЕС відносять: короткочасні відхилення напруги та короткочасні відхилення частоти.

Слід зазначити, що протягом останніх двадцяти років у суднобудуванні відбувалися швидкі та радикальні зміни, які пов'язані з удосконаленням та застосуванням гребних електричних установок. У ці роки для керування гребними двигунами змінного струму були розроблені перетворювачі частоти великої потужності, створені винторульові стовпчики, сучасні гребні установки. Ці досягнення набагато підвищили якісні характеристики гребних установок і дозволили їм потіснити пропульсивні комплекси з тепловими двигунами, що працюють безпосередньо на гребний гвинт. Порівняно з іншими видами пропульсивних комплексів сучасні гребні електроустановки мають ряд переваг:

– підвищення надійності суднової електроенергетичної установки та



пропульсивного комплексу;

- покращення маневреності судна;
- підвищення ККД енергетичної установки різних режимах;
- низькі рівні шуму та вібрації;
- зниження експлуатаційних витрат;
- зменшення термінів ремонтних робіт;
- можливість раціональнішого розміщення обладнання на судні.

Унікальні властивості сучасних гребних установок дозволили в дуже короткий час знайти застосування на судах практично всіх видів: круїзних лайнерах, поромах, контейнеровозах, танкерах, рибпромислових, буксирах, судах постачання тощо.

Електроенергетичні системи сучасних суден з електрорухом будуються як єдині системи, що забезпечують живлення та численні загальносуднові споживачі. Від структури та параметрів СЕЕС залежать вартість проектування та спорудження суден, працездатність електрообладнання та систем автоматики, комерційні показники суден при експлуатації, у тому числі витрата палива, безпека плавання судна та умови роботи екіпажу.

Зазначимо, що серйозною проблемою під час створення СЕЕС є забезпечення електромагнітної сумісності загальносуднових споживачів та гребних установок, яка для суднової електростанції є нелінійним навантаженням. На вимогу морського реєстру судноплавства [2] у повністю укомплектованій суднової електроенергетичній системі коефіцієнт несинусоїдальної кривої напруги не повинен перевищувати 10%.

Суднобудівні організації застосовують структуру СЕЕС з трансформаторами у складі головної енергетичної установки (ГЕУ). У таких установках проблема електромагнітної сумісності достатньо успішно вирішено.

При створенні сучасних СЕЕС з повним електрорухом необхідна генерація та перетворення електричної енергії для потужних споживачів з використанням сучасних напівпровідникових перетворювачів та забезпечення їх надійної роботи.



Замість існуючої раніше так званої інтерференції гармонійного складу напруги в сучасних СЕЕС гармонійний склад напруги в електричній гілці підсумовується. Це є основною відмінністю поставленого завдання від численних робіт з покращення гармонійного складу у «великій» та автономній енергетиці.

Для створення СЕЕС необхідний системний підхід з урахуванням нормативних вимог документів. Відповідно до них вступають у дію крім обмеження за якістю електроенергії та інші вимоги (надійність, масогабаритні показники, електромагнітна сумісність, теплові втрати та ін.) При цьому необхідно використовувати кілька ознак.

На СЕЕС бажано досягати мінімального гармонійного складу за рахунок щодо низьковитратних способів перетворення електроенергії (використання діодних мостів випрямлення, широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для систем управління, багаторівневих інверторів, розщеплення обмоток та ін.). В останню чергу необхідно використовувати різні фільтри, у тому числі активні.

Зазвичай на гармонійний склад струму та напруги в СЕЕС впливають такі фактори:

- параметри генератора;
- потужність еквівалентного асинхронного навантаження;
- наявність традиційних фільтрів та фільтрокомпенсуючих пристроїв та їх параметри;
- використання активних фільтрів;
- використання у статичних напівпровідникових перетворювачах (СНП) широтно-імпульсної модуляції;
- використання багаторівневих інверторів;
- фазність системи електроруху;
- тип електродвигуна системи електроруху (синхронний, асинхронний, вентильний).

Аналізуючи досвід проектування та експлуатації СЕЕС, можна сказати що загальносудові споживачі, залежно від режиму роботи, споживають від 10 до



20% потужності. Однак використання потужних статичних перетворювачів у системах електроруку інших споживачів змушує за новим формувати вихідну напругу при забезпеченні якості електроенергії.

Зазначимо, що статичні перетворювачі генерують у мережу вищі гармоніки. Загальновідомі їх негативні наслідки: зниження ККД та моментів електродвигунів, підвищений рівень нагрівання елементів системи, збої в системах управління, зв'язку та інше. Як що розглядати типову структурну схему (рис. 1), то видно, що необхідно забезпечувати синусоїдальність струмів і напруг як на головному розподільчому щиті (ГРЩ), так і на підсистемі електроруку.

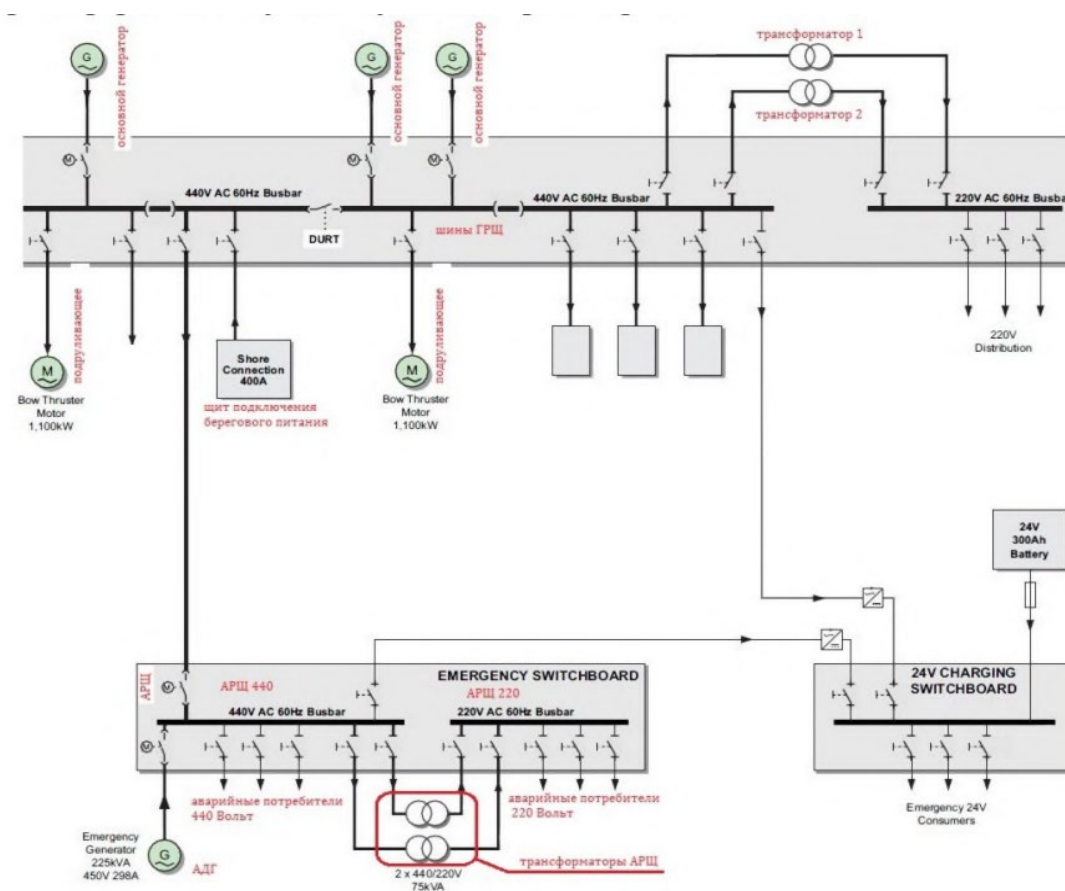


Рисунок 1 – Структурна схема суднової електроенергетичної системи судна

Основним параметром, що впливає на гармонійний склад напруги на ГРЩ, типових генераторів є надперехідний індуктивний опір. Зменшення цього опору наближає реальне джерело електроенергії до джерела нескінченної потужності. Щодо суднових генераторів надперехідний індуктивний опір змінюється від 0,11



до 0,32 ум.од.

На судах часто встановлюються приймачі, які вимагають своєї роботи електричну енергію з параметрами, відмінними від тих, з якими її виробляють джерела електричної енергії.

Наприклад, на судні як джерела електричної енергії встановлені трифазні генератори напругою 400 В, а для приймачів – електричного освітлення – потрібна напруга 220 В. На невеликих судах встановлено джерело – генератор постійного струму 27 В, а приймач – холодильник, що працює від мережі змінного струму 220 В. У цих випадках для живлення зазначених приймачів потрібна установка відповідних перетворювачів. Найпростіше виконати такі перетворювачі у вигляді двомашинного агрегату, де одна машина – двигун – має бути розрахована на електроенергію з параметрами джерела, а інша – генератор - повинна виробляти електроенергію з параметрами, які необхідні для роботи цих приймачів.

Однак перетворювачі, що обертаються, мають ряд недоліків, які властиві всім машинам, що обертаються, наприклад, наявністю ковзаючих контактів, підшипників, тому часто виявляється доцільним використання статичних перетворювачів, яких немає частин, що переміщуються одна щодо іншої.

У суднових електростанціях перетворення електричної енергії зазвичай використовуються трансформатори, випрямлячі та інвертори. Інші перетворювачі, наприклад, перетворювачі частоти, частіше використовуються для окремих електроприводів.

На невеликих судах, на яких джерелом електричної енергії є лише генератор, навішений на головний двигун і виробляє електричну енергію тільки під час роботи головного двигуна, для постачання електроенергії всіх приймачів під час його стоянки необхідне встановлення якогось накопичувача енергії. Цей накопичувач при роботі генератора працює як приймач і накопичує енергію, а під час стоянки генератора переходить у режим джерела та віддає енергію в суднову мережу.

Численні розрахунки та моніторинг - безперервний процес спостереження



та реєстрації параметрів об'єкта, у порівнянні із заданими критеріями дозволяють відзначити, що в заданому діапазоні потужностей, що розглядаються, і при заданих параметрах фільтрів коефіцієнт модуляції інвертора впливає на якість електроенергії в системі електроруку (СЕР), причому збільшення коефіцієнта модуляції (K_T) управління інвертором покращує гармонійний склад СЕР, проте це позначається на рівні напруги інвертора [1].

Для підвищення показників якості електричної енергії (ЯЕЕ) пропонується застосування сучасних FACTS - (Flexible AC Transmission System) - гнучкі керовані системи змінного струму, для регулювання реактивної потужності та напруги в судновій електроенергетичній системі та зниження гармонік струму та напруги, а також коливання напруги при різких навантаженнях.

До пристроїв FACTS відносяться пристрої: поздовжньої компенсації як традиційного типу, так і регульовані тиристорно-реакторні групи, статичні тиристорні компенсатори; вставки постійного струму; електромеханічні перетворювачі частоти. Якщо до цього класу пристроїв віднести керовані реактори та синхронні компенсатори, то під FACTS слід зазначити, що застосування гнучких передавальних систем змінного струму підвищує якість електричної енергії [3].

Нова елементна база дала можливість створити новий клас перетворювачів – автономних інверторів напруги і статичних синхронних компенсаторів на їх основі. Сукупність пристроїв, що встановлюються в судновій електричній мережі та які призначені для стабілізації напруги, підвищення стійкості, оптимізації, поточкорозподілу, зниження втрат, покращує якість електричної енергії.

Установка швидкодіючих STATCOM на шинах високої напруги (ВН, напругою 6 кВ) та низької напруги (НН, (440 В)). Такий розподіл STATCOM дозволяє покращити показники якості електричної енергії на СЕЕС [4]. На рисунку 2 наведено схематична схема уявлення STATCOM.

STATCOM, відомий як статичний компенсатор, є частина сімейства пристроїв, відомих як FACTS, призначений для стабілізації напруги шляхом

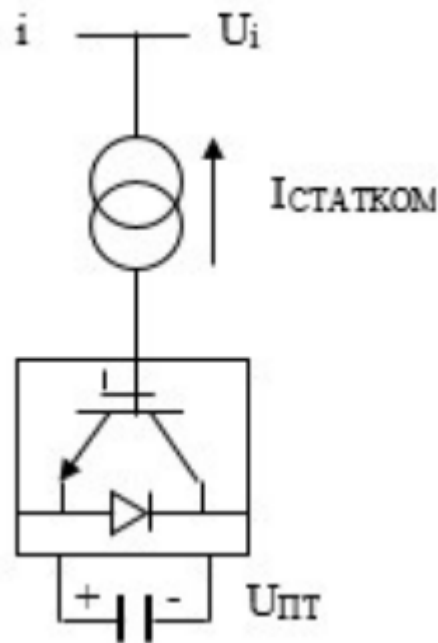


Рисунок 2 – Схематичне подання STATCOM

виявлення та негайної компенсації коливань або мерехтіння та регулювання коефіцієнта потужності [5].

STATCOM – це інвертор, що працює як джерело напруги і може постачати або споживати реактивну потужність. Як пристрій він повністю має електронний контроль, STATCOM може доставити як ємнісну, так і індуктивну реактивну потужність. STATCOM здатний вирішити всі завдання та має перевагу в швидкодії, яка становить 20 мс. Можливість форсування реактивної потужності є важливою властивістю STATCOM під час вирішення задач підтримки напруги на судових електростанціях в аварійних і післяаварійних режимах мережі.

Використання таких швидкодіючих STATCOM дозволяє зниження коливань напруги під час пусків асинхронних двигунів.

Підсумки та висновки. Проведені дослідження продемонстрували залежність стійкості роботи судової електроенергетичної системи, а також підвищення показників якості електричної енергії пропонується застосування сучасних FACTS для регулювання напруги та реактивної потужності. В роботі встановлено, що застосування швидкодіючих STATCOM дозволяє виконати зниження коливань напруги під час пусків асинхронних двигунів.