

УДК 629.5.023
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).2](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).2)

STUDY OF CONCEPTUAL AND TECHNOLOGICAL VARIATIONS OF FLOATING PHOTOELECTRIC SYSTEM DESIGNS

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕПТУАЛЬНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВАРІАЦІЙ КОНСТРУКЦІЙ ПЛАВУЧИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Margarita M. Niroumand
mn.niroumand@gmail.com
ORCID: 0009-0008-4672-9936
Volodymyr V. Zaytsev
Zvv1949@gmail.com

М. М. Ніруманд,
аспірантка
В. В. Зайцев,
д-р техн. наук, професор

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. A research of technological and structural variations of design and already operating floating photovoltaic systems was conducted by reviewing the documentation on the main technologies, and a scientific classification of these systems was developed.

Purpose. The purpose of this study is to identify and classify the technological and design variations in the design and operation of floating photovoltaic installations by reviewing the main technology documentation, literature and studies on FPV design, and providing technical data from some of the largest and most well-known developed.

Method. Analysis of publications found since 2017, research of scientific articles and results to determine the scientific results obtained during experiments and research, and the creation of new concepts for floating photovoltaic installations.

Results. According to the analysis of the structure of the leading and most modern floating solar installations, the problem with the type of supporting structures, overall stability and the relationship between them has not yet been resolved.

Scientific novelty. The study and classification of floating photovoltaic systems is carried out for the first time, based on the analysis of existing and designed systems over the past 10 years.

Practical importance. The rapid leap in the development of floating solar power plants requires more accurate data on the rational design of the floating installation, a method for testing wind and wave loads, and a separate study of the relationship between weight and stability of the supporting structure.

Key words: floating solar system; FPV system; floating solar installation.

Анотація. Було проведено дослідження технологічних та конструкційних варіацій проектних та вже працюючих плавучих фотоелектричних систем за допомогою огляду документації по основним технологіям, та розроблена наукова класифікація цих систем.

Мета. Мета цього дослідження – окреслення та класифікація технологічних та конструкційних варіацій в проектних та вже працюючих плавучих фотоелектричних установках за допомогою огляду документації по основним технологіям, літератури та дослідженням, присвяченим проектуванню FPV, а також надання технічних даних деяких з найбільших та найвідоміших установок.

Метод. Аналіз знайдених публікацій з 2017 року, дослідження наукових статей і результатів для визначення наукових результатів, отриманих під час проведення експериментів та досліджень, і створення нових концепцій плавучих фотоелектричних установок.

Результати. Згідно з аналізом будови провідних та найсучасних плавучих сонячних установок проблема з типом несучих конструкцій, загальною остійністю та взаємозв'язком між ними досі не вирішена.

Наукова новизна. Дослідження та класифікація плавучих фотоелектричних систем проводиться вперше, на основі аналізу існуючих та проєктованих систем за останні 10 років.

Практична значимість. Швидкий стрибок у розвитку плавучих сонячних електростанцій потребує більш точних даних щодо раціональної конструкції плавучої установки, методу перевірки вітрових та хвильових навантажень, та окремого дослідження зв'язку між вагою та остійністю несучої конструкції.

Ключові слова: плавуча сонячна система; система FPV; плавуча сонячна установка.

ВСТУП

Галузь плавучих фотоелектричних установок відносно нова – вона почала свій розвиток з кінця 1999 року і зараз потужність цих установок росте у геометричній прогресії. Використання водних поверхонь, таких як озера, ставки, кар'єри шахт, дамби та водосховища надає велику можливість отримання сонячної енергії. Через обмежену кількість сільськогосподарських земель установки FPV мають більш високу ефективність землекористування (1,33 МВт/га) [1].

Системи FPV складаються з фотоелектричних панелей які встановлені на плавучі понтони та поєднані електричними кабелями з інверторами. Також система обладнана швартовною системою або судновими якорями, концентраторами та при необхідності – хвилеломами. Витрати на виробництво енергії для плавучих фотоелектричних систем на 10 відсотків вище, ніж затрати для звичайних наземних установок через використання швартовних ліній та додаткових вимог до міцності та стійкості конструкцій.

Залишається багато питань щодо оцінки впливу на навколишнє середовище та обмеження досліджень щодо аеродинамики, гідродинамики та комбінованого навантаження на установки. Відсутність стандартів та норм проектувань затримує розвиток галузі та прогрес технологій. Можливість поєднання наземних фотоелектричних установок з плавучими опорами дала поштовх для народження нової галузі – плавучих фотоелектричних установок FPV.

Через обмеження сільськогосподарських угідь необхідність впровадження рішень, нейтральних до землі стала очевидною. Останніми роками плавучі фотоелектричні електростанції дуже динамічно розвиваються у всьому світі. Згідно звіту Груп Світового банку на початок 2018 року глобальна встановлена потужність була 1,1 ГВт. У 2021 року встановлена потужність у всьому світі становила 2,6 ГВт [1].

Максимальна потужність у ватах використовується для визначення вихідної потужності установки при стандартних умовах. Стандартними умовами вважаються температура 25°C та чисте небо для 1000 Вт/м². Системи FPV мають вищі інвестиційні витрати тому їм важче конкурувати на місцевих тендерах. Тому доцільно проводити спеціальні інноваційні тендери для плавучих фотоелектричних установок, які все ще потребують стимулювання ринку. «Щоб уникнути тривалих змін у землекористуванні, нейтральній до землі плавучій фотоелектричній технології слід надати привілейовану позицію, як це вже має місце сьогодні для вітрових електростанцій», – каже доктор Гаррі Вірт, директор підрозділу фотоелектричних модулів і електростанцій Fraunhofer ISE [1].

Переваги плаваючих фотоелектричних систем:

- Велика кількість невикористаних площ: кар'єрні озера, ставки, водосховища, дамби, затоки.

- Вища ефективність модулів завдяки ефекту охолодження водою.

- Зменшення витрат випаровування води у сухому кліматі завдяки зменшенню швидкості випаровування.

- Менша сонячна радіація захищає екосистему водойми від потенційно шкідливого цвітіння водоростей.

- Можливість сполучення з вітро або гідроенергетикою та подвійне використання інфраструктури, зменшення витрат для експлуатації та обслуговування.

Потреби в оптимізації:

- Надання інвестиційній привабливості через банківську підтримку та впровадження стандартів проектування, експлуатації та страхування FPV.

- Визначення екологічно чистих та небезпечних матеріалів, які здатні витримати високу корозійну активність та вітрові і хвильові навантаження.

- Кріплення плавучої установки та з'єднання з існуючими електричними мережами.

Основні компоненти, які присутні у плавучій фотоелектричній системі:

- Структурна система. Це основа для подальшого кріплення фотоелектричних модулів під певним нахилом. Зазвичай складається з профілей С-типу для балок кріплення та W-типу для колонн. Матеріал профілей – алюміній або армований пластик. Конструктивна система з'єднує плаваючі опори з несучими елементами установок. Основне завдання – забезпечення міцності та стійкості конструкції до хвильових та вітрових навантажень.

- Плаваюча система. Забезпечує плавучість модулів та статичну і динамічну стабільність у водоймах. Багато виробників використовують формовані поплавкові понтони.

- Якірна система, яка забезпечує утримання на місці плавучої платформи. Існує берегове швартування або донні якорі. Донні якорі можуть становити загрозу, якщо плавуча фотоелектрична система знаходиться у ірригаційних резервуарах.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Огляд плавучих фотоелектричних установок

У зв'язку з достатньо новими технологіями, які ще перебувають у розвитку, технічні дані та нормативна література для конструкцій та установок вкрай обмежена.

Багато досліджень плавучих фотоелектричних установок проводиться у рамках досліджень в університетах для техніко-економічної оцінки електричних характеристик та оптимізації.

Класифікація плавучих фотоелектричних установок

Численні проекти за останні кілька років призвели до розробки різних плавучих конструкцій, що характеризуються різними конструкціями та матеріалами

залежно від місця встановлення та призначення. З метою забезпечення стандартизації у 2021 році DNV опублікував рекомендовану практику DNV-RP-0584 (10), де плавучі конструкції класифікуються на три основні види по типу підтримуючих конструкцій:

- Чисті поплавки, де фотоелектричні модулі встановлюються безпосередньо на поплавках.
- Модульні плоти, де панель підтримується структурним каркасом, з'єднаним з поплавком.
- Мембрани, де панелі кріпляться до армованої мембрани, яка підтримується трубчастим кільцем, що забезпечує плавучість.

На рисунку 1 показано три основні типи конструкцій FPV.

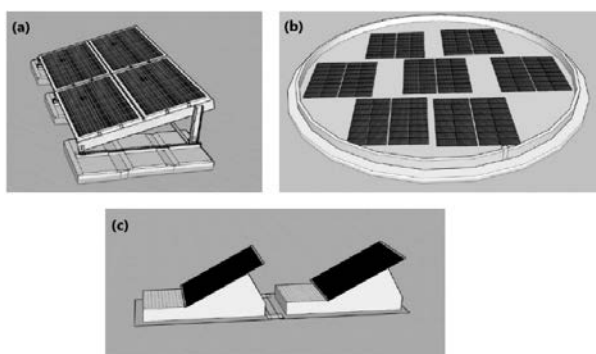


Рис. 1. Типи конструкцій FPV: а – модульні плоти, в – мембрани, с – чисті поплавки

Однак можливі й інші класифікації. У [2, 3] автори виділяють класифікацію по масогабаритним показникам:

- Клас 1: великогабаритні плоти, виготовлені з труб з поліетилену високої щільності (ПНД) плюс сталевих, алюмінієвих або композитних компонентів.
- Клас 2: середні – повністю з ПНД, мономодулі невеликих розмірів, з'єднані між собою відповідними гаками.
- Клас 3: малі: плавучі понтони.

Зображення структури класу 1 показано на рисунку 2.

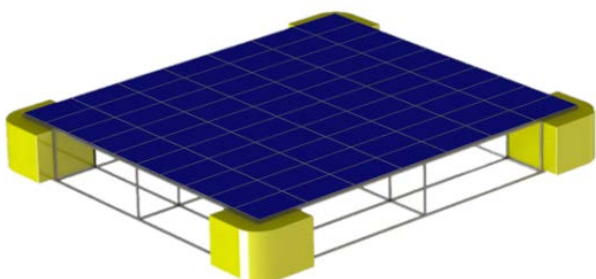


Рис. 2. Великогабаритні плоти

Структури класу 2 (рис. 3) використовують у компанії Ciel & Terre, яка виконала проект у прісноводних водоймах у провінції Аньхой, Китай та розташована в колишньому вугледобувному районі. Система ВДЕ була підключена до національної електромережі і підключена до національної електромережі і, як очікується, буде генерувати до 77 693 МВт-год на рік [4].



Рис. 3. Структура класу 2

Одним із прикладів структур класу 3 (рис. 4–6) є платформа, розроблена німецькою компанією BayWa г.е. [5] у Нідерландах.



Рис. 4. Структура класу 3, каркас конструкції

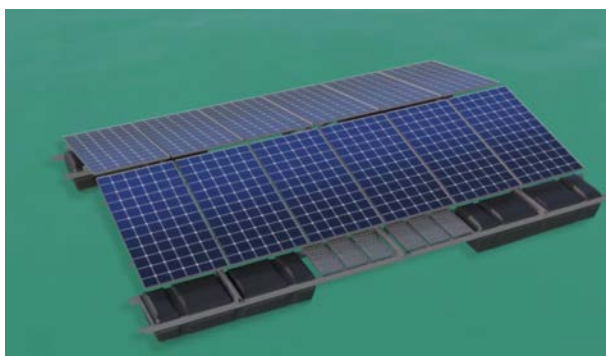


Рис. 5. Структура класу 3, розташування сонячних панелей



Рис. 6. Структура класу 3, повна конструкція у водоймах

Дизайн спрямований на максимізацію міцності конструкції при мінімізації витрат і впливу на навколишнє середовище, – поплавки виготовлені з пластикового матеріалу, який відповідає екологічним нормам, щоб уникнути ризику потрапляння мікропластику у воду.

Вони були розроблені таким чином, щоб мінімізувати площу поверхні, що контактує з водою, щоб уникнути надмірного росту водоростей і забезпечують вільне проходження води, щоб не накопичувати сміття. Поплавці з'єднані з конструкцією з нержавіючої сталі, що дозволяє знизити матеріальні витрати за рахунок забезпечення механічної та корозійної стійкості, в той час як фотоелектричні панелі встановлюються на конструкції, по 12 на кожній платформі. Уздовж однієї з передніх сторін платформи, між двома поплавками, знаходиться трап, який використовується для проведення робіт з технічного обслуговування та ремонту. Ці платформи спроектовані як модульними, і, з'єднуючи послідовно кілька платформ, перехідні містки утворюють довгі шляхи які дозволяють легко працювати з кожною панеллю масиву.

Таким чином, структури класу 3 мають потенціал для подальшого аналізу та наукового дослідження зв'язку між вагою несучих конструкцій та остійністю. Несуча конструкція з нержавіючої сталі є основним елементом, який має значний вплив на остійність плавучої модульної установки.

В таких конструкціях необхідно винайти геометричне співвідношення між розподіленням маси та остійністю. Адаптація понтонів та їх спроможність повільно хитатися на хвилях залежить від їх метацентричної висоти.

Тож необхідно провести аналіз профілей, які можуть збільшити міцність, але зменшити вагу конструкції.

Міцність профілей та їх маса взаємопов'язані та прямим чином впливають на остійність всієї конструкції.

Обзор даних гідродинамічного аналізу

Petter Plünneke Borvik [6] провів аналіз двох моделей у хвильовому резервуарі. Одна з моделей була запроектована жорсткою, друга – пружною. Випробування проводилось при регулярних та нерегулярних хвилюваннях. Аналіз був перевірений також

численними методом шляхом поєднання теорії для плаваючого понтона та вертикального руху корабля з поверхневим ефектом (SES).

Була досліджена глобальна поведінка жорсткої та пружної моделі у хвилях та знайдено різниця. Аналіз виявив, що пружна модель більш здатна слідувати за хвилями.

Для обох моделей (Рис. 7) спостерігалися нелінійні явища, такі як відсутність води та перевищення хвиль. Обидві моделі подавалися на правильні хвилі з періодом 12,1 с і крутизною $= 1/20$, а також на нерегулярні хвилі з $T_p = 12$ с і $H_s > 5$ м.

Chun Bao Li [7] та Joonmo Choung [7] провели дослідження демонстраційного проекту сонячної фотоелектричної установки, що складається з чотирьох типів підстанцій, які будуть експлуатуватися на узбережжі морської дамби Saemangeum. Гідродинамічний аналіз був проведений для визначення навантажень, що діють на плавучі фотоелектричні електростанції, на яких два типи каркасних конструкцій підтримували фотоелектричні панелі навісного та двохсклоного типу, створюючи чотири типи підстанцій, що складаються з трьох плавучих понтонів.

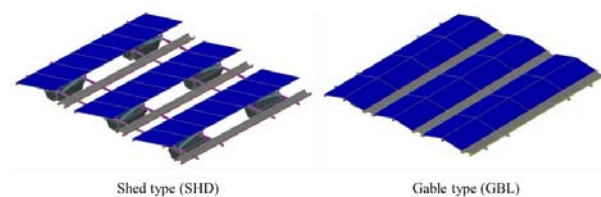


Рис. 7. Сонячна фотоелектрична установка Saemangeum

У роботі були розглянуті гідродинамічні взаємодії між поплавками, оскільки поплавці були з'єднані шарнірними з'єднаннями. Гідродинамічний аналіз здійснювався за допомогою Ansys/Aqwa у хвильовому навантаженні трьох напрямів: 0° (напряв), 45° , and 90° (у-напряв).

Рух по крену не збуджується наступним х-напрямом (кут $= 0^\circ$), в той час як у-напряв (кут $= 90^\circ$) може дещо розвинути рух по тангажу з досить високою частотою 4 рад/с. Як і очікувалося, кут $= 45^\circ$ збуджувало одночасно рухи качки, крену і тангажу.

Аналіз аеро-гідро-пружного зв'язку

K. Trapani and D. Millar [8] провели аналіз за допомогою обчислювальної гідродинаміки (CFD) який оцінював аеродинамічну та гідродинамічну взаємодію між регулярними хвилями і гнучким тонкоплівковим фотоелектричним масивом.

У статті описано природу взаємодії тонкоплівкового фотоелектричного композиту композиту з хвилями та очікуване загасання хвиль від такого масиву. Також визначено основні сили, що діють на плавучу фотоелектричну систему на плавучу фотоелектричну

систему і характеризує їх для складних та екстремальних погодних умов. Результати показують що швартові зусилля значно нижчі, ніж у хвильових перетворювачів енергії, головним чином завдяки високій гнучкості та тонкого профілю.

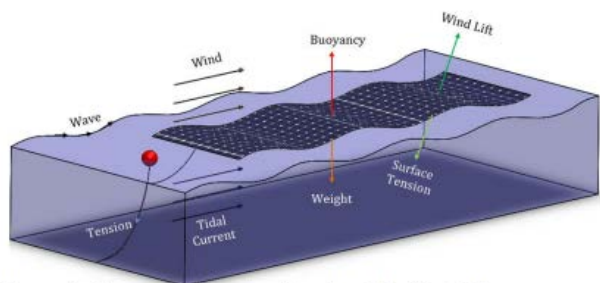


Figure 1: Forces acting on a floating thin film PV array.

Рис. 8. Концепція тонкої плівки

Концепція тонкої плівки (Рис. 8) згинається під дією зустрічних хвиль, і передача енергії на основі цього припущення розраховується передача енергії. Енергетичне загасання розраховується за мінімальною енергією, необхідної для того, щоб зігнути структуру відповідно до профілю хвилі, що набігає. Дослідниками були враховані складні погодні умови зі швидкістю вітру 25 м/с і приливною течією 0,5 м/с, при яких навантаження на швартовний пристрій становило 72 кН (для масиву 200 м х 600 м). Виходячи з результатів моделювання, подібний причал з номінальним навантаженням 35 кН може витримати навантаження від гнучкого тонкоплівкового фотоелектричного масиву розміром 100 м х 100 м (за умови, що коефіцієнт запасу міцності дорівнює 4). Встановлена потужність фотоелектричної системи CIGS з такими розмірами становитиме приблизно 1,2 МВт. Таким чином, при тій самій встановленій потужності, що і хвильові перетворювачі енергії, гнучкі плавучі фотоелектричні панелі можуть знизити навантаження на причал на 80% і мати аналогічні переваги у витратах на причал.

Результати CFD також показали, що в більш екстремальних погодних умовах, при швидкості вітру 50 м/с і приливній течії 3,5 м/с, приливна течія створює виштовхуючу силу занурюючи фотоелектричний масив. Хоча очікується, що як тільки масив зануриться під воду, коли приливна течія пройде над і під панелями, приливна сила буде врівноважена приливним підйомом, і швартовна напруга буде суттєво зменшиться (аеродинамічна підйомна сила буде дорівнювати нулю). Теорія Морісона для розрахунку хвильових сил на тонких структурах використовується для визначення величини будь-яких інерційних сил, що діють на систему, але для цих умов стверджується, що припливні та хвильові інерційні компоненти припливу і хвильової інерції є мізерно малими. Результати, отримані в складних погодних умовах, показали,

що навантаження на причал буде помірним порівняно з хвильовим перетворювачем енергії і, припускаючи коефіцієнт запасу міцності 4, може вмістити установку майже в 5 разів більшу за встановлену потужність. Демонстраційний проект плавучої тонкоплівкової фотоелектричної установки планується незабаром розгорнути біля узбережжя Мальти, компанією OPPV Ltd.

Навантаження і граничні стани для проектування

Плавучі споруди протягом свого життя піддаються різним навантаженням: постійним, експлуатаційним, екологічним, монтажним та випадковим. Більшість цих навантажень генеруються умовами навколишнього середовища і можуть бути спрогнозовані на основі історичних даних з відкритих баз даних таких як ECMWF ERA5 [9].

Основними елементами, які слід враховувати, є наступні: вітер, хвилі і течії, температура і сонячне випромінювання:

- Вітер: є домінуючим зовнішнім фактором, створює підйомну силу і силу лобового опору на систему FPV, а також динамічні навантаження.

- Хвилі: хвилі нерозривно пов'язані з вітром: коли дме вітер, він збуджує поверхню моря через тертя і коливання тиску, створюючи хвилі. У випадку великої FPV-системи, через велику кількість з'єднаних між собою поплавків, гідродинамічну взаємодію між окремими поплавками необхідно враховувати гідродинамічну взаємодію.

- Течії: течії пов'язані з бічними навантаженнями або силами опору, які можуть викликати вихрові індуквані коливання.

- Сонячне випромінювання: виробництво енергії можна класифікувати на дві основні форми: глобальне горизонтальне опромінення (GHI) і пряме нормальне опромінення (DNI), що вимірюється в кВт-год/м². Виходячи з цих даних та враховуючи ефективність панелі, можна можна оцінити річний обсяг виробленої енергії.

- Температура: температура навколишнього середовища впливає на втрати передачі через вироблене тепло.

На основі результатів розрахунків медодом кінцевих елементів виготовляються конструктивні елементи плавучої електричної установки та вимірюються механічні властивості. Крім того, у нижчезказаних роботах представлено конструкцію з'єднань модулів, плавучої системи та експериментальні результати зміщень і деформацій, виміряних під час натурних випробувань конструкції, встановленої в прибережній зоні у затоці Тонген, Корея. Було проведено статичний 3D FE аналіз що включає вітрове, снігове і льодове навантаження, прикладені відповідно до IEC 61646 [13].

Y.-G. Lee, S.-J. Yoon, H.-J. Joo, and J.-H. Nam [10] виконали оптимізацію конструкції, шляхом зменшення потреби в матеріалах та збільшення потужності.

S. Yoon, H. Joo, and S. Kim (6) задокументували структурний аналіз і також включили додаткову інформацію про швартовну систему установки, систему плавучості та типи з'єднань елементів конструкції.

Prof. Dr.-Ing. H. Ruscheweyh [11] розробив аналіз вітрового навантаження згідно з Евронормами, шляхом аналізу фотоелектричної установки у аеродинамічний трубі.

Більшість каркасів, що підтримують фотоелектричні модулі в існуючих фотоелектричних електростанціях, зроблені з конструкційної сталі. Загалом, конструкційна сталева рама вразлива до корозії, що призводить до корозії, яка збільшує витрати на технічне обслуговування і та призводить до скорочення терміну служби конструкції. Також достатньо велика вага сталених конструкцій вимагає також більшої плавучої системи, що в свою чергу збільшує вартість конструкції в цілому.

Song and Choi [12] представили процес проектування та будівництва плавучої фотоелектричної системи потужністю 1 МВт з використанням армованого волокнами полімерного пластику (FRP) елементів. FRP має чудові властивості матеріалу порівняно з властивостями звичайних конструкційних матеріалів. FRP має відмінну корозійну стійкість і високу питому міцність і жорсткість, обидві з яких які високо цінуються при проектуванні та виготовленні плавучих систем фотоелектричної генерації.

Song and Choi виконали плавучу систему фотоелектричної електростанції з PFRP (пултродований склопластик) та SMC (листовий склопластик); склопластик був виготовлений з поліефірної смоли та скловолокна Е-скло.

Цей плавучий фотоелектричний комплекс потужністю 1 МВт складається зі 105 одиничних конструкцій. Блок-структури з'єднані між собою на поверхні води. Більше того, плавучий фотоелектричний комплекс потужністю 1 МВт є першою комерційною системою, побудованою на майданчику такого великого масштабу в Кореї.

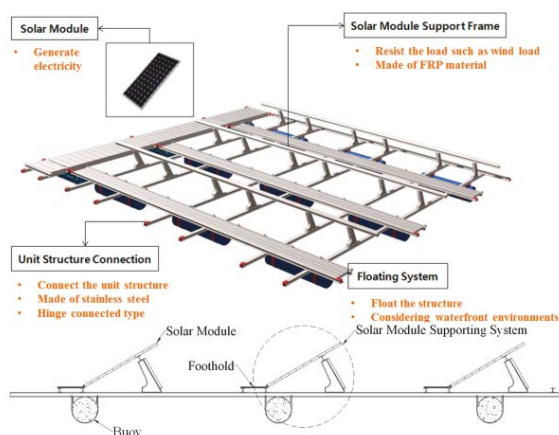


Рис. 9. Плавучий комплекс блочної електричної установки

Плавучий комплекс плавучої електричної установки (Рис. 9) виконан за допомогою з'єднання блочних конструкцій болтами або сталевими елементами, щоб мінімізувати передачу будь-якого згинального моменту, викликаного нестабільним рухом водної поверхні.

Таким чином, ми можемо класифікувати плавучі системи по типу матеріала:

- конструкційної сталі;
- з алюмінію;
- з полімерного пластику;
- з листового склопластику.

M. Redón Santafé, J. B. Torregrosa Soler та ін. [13] у своєму дослідженні приділили більш уваги теоретичній та експериментальній частині. Їх система потужністю 300 кВт була встановлена завдяки успіху попереднього прототипу, описаного в першій роботі і вона покрила всю поверхню водосховища. У проєкті був зосереджен погляд на наступних пунктах:

– Орієнтація та нахил фотоелектричних панелей для оптимізації вироблення енергії залежно від широти місцевості та розмірів панелей.

– Вплив нахилу панелей на вітрове навантаження, затінення, потужність щільність та початкові інвестиційні витрати.

– Батиметричні характеристики водосховища. Це обмеження деяких водосховищ в тому, що їх основні орієнтації можуть бути або не бути оптимальними для максимального виробництва енергії.

– Дизайн плавучого модуля: геометрія, розмір і вибір матеріалу. Підкреслено, що плавучі модулі повинні бути універсальними, щоб пристосуватися до варіацій глибини води та похилих набережних з нахилом. Також зазначена конструкція поплавка-понтону як ключовий параметр технічних вимог проєкту. Спеціально відформована полімерна конструкція плавучого резервуару, яка дозволяє встановлювати дві панелі. Ця конструкція спрощує наступні етапи: виробничий процес, дизайн і конфігурацію платформи, монтаж і запуск, а також збільшує використання енергії.

Огляд та перелік існуючих установок

У розділі представлений огляд, який документує існуючі установки та перелік деяких з найновіших, найбільших і унікальних установок. На додаток до техніко-економічного аналізу, обговорюються деякі з перших розробок FPV розробку, встановлену на внутрішніх територіях у Каліфорнії, Японії та Італії.

Будівництво плавучих сонячних установок у промислових обсягах (більше 100 кВт) почалося досить нещодавно, у 2018 році. Восени 2018 року розпочалося будівництво першої великої масштабна FPV-система у Франції розпочала будівництво, яка також стала першою, де було використано Hydrelia® Air від Ciel et Terre. У 2018 році найбільша в Австралії плавуча фотоелектрична система встановленою потужністю

100 кВт була на очисних спорудах у Новому Південному Уельсі.

Проект потужністю 17 МВт, а саме O'MEGA1, розроблен компанією Akuo Energy і завершений у березні 2019 року. У 2019 році перша FPV-установка в Камбоджі була встановлена на резервуарі цементного заводу. Проект потужністю 2,8 МВт також став першим, де було застосовано варіацію Hydrelia® Equato.

Sunsear Group та Badan Pengusahaan Batam (BP Batam) підписали меморандум про взаєморозуміння щодо будівництва плавучої фотоелектричної системи та системи зберігання енергії на водосховищі на острові Батам в Індонезії.

Проект вартістю 2 мільярди доларів дозволить Sunsear розробити плавучу сонячну електростанцію та систему зберігання енергії на водосховищі Дурі-ангканг на півдні острова Батам.

Плавуча сонячна електростанція матиме потужність 2,2 ГВт і займатиме близько 1600 гектарів, що зробить її найбільшою на сьогоднішній день у світі, згідно з даними Sunsear. Система зберігання енергії (ESS) матиме потужність понад 4000 МВт-год. Вироблена та збережена енергія забезпечуватиме безперебійне постачання сонячної енергії в режимі 24/7. Частина зеленої енергії буде споживатися в Батамі, а залишок потенційно може експортуватися до Сінгапуру (приблизно 50 км) по підводному кабелю. Sunsear очікує, що сонячна ферма вироблятиме понад 2600 ГВт-год електроенергії на рік, потенційно компенсуючи понад 1,8 мільйона метричних тонн вуглецю на рік. Це еквівалентно виведенню з доріг понад 400 000 автомобілів щороку. Будівництво планується завершити у 2024 році.

Трирічний проект між комунальною компанією RWE Renewables, Інститутом систем сонячної енергії Фраунгофера ISE та Бранденбурзьким технологічним університетом Котбус-Зенфтенберг (BTU) продемонструє, як підприємства Німеччини можуть розширити свій портфель відновлюваних джерел енергії, не займаючи землю та найкращі проекти для стійких плаваючих сонячних фотоелектричних систем. Буде перевірено кілька плаваючих фотоелектричних систем з різними конструкціями конструкції. Демонстраційна фотоелектрична установка буде спроектована та побудована спільно з Volta Solar. Планується чотири плаваючі фотоелектричні установки та еталонна установка на суші загальною потужністю близько 150 кВт. Heckert Solar, виробник сонячних модулів у Хемніці, підтримуватиме проект інноваційними концепціями фотоелектричних модулів. VDE Renewables оцінює розроблені концепції електростанцій, щоб переконатися, що вони відповідають стандартам та електробезпеці.

Завершення другої черги плавучої фотоелектричної батареї Dezhou Dingzhuang китайським енергетичним гігантом Huaneng International привело загальну потужність до 320 МВт, що вважається найбільшою введеною в експлуатацію в усьому світі. Huaneng

об'єднав плавучу сонячну енергію на базі водойми з вітровою електростанцією потужністю 100 МВт і накопичувачем енергії 8 МВт-год, щоб сформувати проект інтегрованого зберігання вітрової та сонячної енергії Huaneng Dezhou Dingzhuang на майданчику в провінції Шаньдун (Рис. 10).



Dezhou Dingzhuang Floating Solar Farm

Рис. 10. Проект інтегрованого зберігання вітрової та сонячної енергії Huaneng Dezhou Dingzhuang

ВИСНОВКИ

В даній роботі описана класифікація технологічних та конструкційних варіацій в теоретичних та вже працюючих плаваючих фотоелектричних установок.

Плаваюча сонячна енергія, яка зараз на 10–15% дорожча, ніж проекти наземного монтажу, є привабливою пропозицією в районах та країнах, де земля спірна або дефіцитна.

Міжнародна група дослідників підрахувала потенціал «плаваючої» сонячної енергії по всьому світу. Результати показують потенціал генерації 9434 ТВт-год на рік у 114 555 глобальних водосховищах, охоплюючи 30% їх площі. Сполучені Штати лідирують з потенціалом 1911 ТВт-год на рік, за ними йдуть Китай з 1107 ТВт-год на рік і Бразилія з 865 ТВт-год на рік. У 2021 році була розроблена рекомендована практика проектування та експлуатації плаваючих сонячних фотоелектричних систем [14].

Подальша робота у цьому напрямку вимагатиме вирішення проблем з вибором більш оптимальної конструкції з точки зору економічної ефективності. Стає питання в необхідності провести аналіз профілей, які можуть збільшити міцність, але зменшити вагу конструкції. Це можливо зробити шляхом використання більш легкого матеріалу, який вказан вище у класифікації плаваючих ситсем або шляхом зменшення поперечного перерізу профілей.

Міцність профілей та їх маса взаємопов'язані та прямим чином впливають на остійність всієї конструкції. Остійність всієї конструкції залежить від метacentричної висоти надводної частини плаваючої системи, яка прямо залежить від розмірів сонячних панелей та їхнього кута нахилу до сонця.

REFERENCES

- [1] Fraunhofer ISE (2024). Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- [2] Claus, R., López, M. (2022). Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 164, 112502. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112502>.
- [3] Kumar, M., Niyaz, H., Gupta, R. (2021). Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 233, 111408. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111408>.
- [4] Cazzaniga, R., Cicu, M., Rosa-Clot, P., Tina, G., Ventura, C. (2018). Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. *Renew. Sustain. Energy* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.269>.
- [5] BayWa r.e.. BayWa r.e. Floating PV Projects. Available online: <https://www.baywa-re.com/en/solar-projects/floating-pv> (accessed on 02.03.2024).
- [6] Borvik, P. P. (2017). Experimental and Numerical Investigation of Floating Solar Islands, MSc Thesis, Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [7] Choi, Y.-K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact', *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol. 8, no. 1, pp. 75–84.
- [8] Trapani, K., Redón Santafé, M. (2014). A review of floating photovoltaic installations. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*.
- [9] DET NORSKE VERITAS AS. Offshore Standard DNV-OS-H101: Marine Operations, General. Technical Report. Available online: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNVPM/codes/docs/2011-10/os-h101.pdf>
- [10] Lee, Y.-G., Yoon, S.-J., Joo, H.-J., and Nam, J.-H. (2010). Modified Design of Floating Type Photovoltaic Energy Generation System', *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, vol. 1, no. 4, pp. 18–27.
- [11] Ruscheweyh Consult GmbH Aachen, Windlasten an einer Musterkonfiguration für PV-Freiland-Anlagen in Süd-Aufständerung für die Firma SL Rack GmbH, Aachen. (2020)
- [12] Choi, Y.-K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact', *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol. 8, no. 1, pp. 75–84.
- [13] Redón-Santafé M. (2014). Implementation of a photovoltaic floating cover for irrigation reservoirs. *Journal of cleaner production*, vol. 66, pp. 568–570.
- [14] DNV GL AS. Recommended Practice DNVGL-RP-0584: Design, Development and Operation of Floating Solar Photovoltaic Systems. Technical Report. (2021). Available online: https://brandcentral.dnv.com/fr/gallery/10651/others/0338546af264473e8481ba6ea78daf0f_hi.pdf?_ga=2.10214133.1591987004.166908438876152154.1669084388 (accessed on 18 August 2022).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Fraunhofer ISE (2024). Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- [2] Claus, R., López, M. (2022). Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 164, 112502. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112502>.
- [3] Kumar, M., Niyaz, H., Gupta, R. (2021). Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 233, 111408. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111408>.
- [4] Cazzaniga, R., Cicu, M., Rosa-Clot, P., Tina, G., Ventura, C. (2018). Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. *Renew. Sustain. Energy* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.269>.
- [5] BayWa r.e. BayWa r.e. Floating PV Projects. Available online: <https://www.baywa-re.com/en/solar-projects/floating-pv> (accessed on 02.03.2024).
- [6] Borvik, P. P. (2017). Experimental and Numerical Investigation of Floating Solar Islands, MSc Thesis, Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [7] Choi, Y.-K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact', *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol. 8, no. 1, pp. 75–84.
- [8] Trapani, K., Redón Santafé, M. (2014). A review of floating photovoltaic installations. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*.
- [9] DET NORSKE VERITAS AS. Offshore Standard DNV-OS-H101: Marine Operations, General. Technical Report. Available online: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNVPM/codes/docs/2011-10/os-h101.pdf>
- [10] Lee, Y.-G., Yoon, S.-J., Joo, H.-J., and Nam, J.-H. (2010). Modified Design of Floating Type Photovoltaic Energy Generation System', *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, vol. 1, no. 4, pp. 18–27.
- [11] Ruscheweyh Consult GmbH Aachen, Windlasten an einer Musterkonfiguration für PV-Freiland-Anlagen in Süd-Aufständerung für die Firma SL Rack GmbH, Aachen. (2020)
- [12] Choi, Y.-K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact', *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol. 8, no. 1, pp. 75–84.
- [13] Redón-Santafé M. (2014). Implementation of a photovoltaic floating cover for irrigation reservoirs. *Journal of cleaner production*, vol. 66, pp. 568–570.
- [14] DNV GL AS. Recommended Practice DNVGL-RP-0584: Design, Development and Operation of Floating Solar Photovoltaic Systems. Technical Report. (2021). Available online: https://brandcentral.dnv.com/fr/gallery/10651/others/0338546af264473e8481ba6ea78daf0f_hi.pdf?_ga=2.10214133.1591987004.166908438876152154.1669084388 (accessed on 18 August 2022).

© Ніруманд М. М., Зайцев В. В.

Дата надходження статті до редакції: 05.10.2024

Дата затвердження статті до друку: 14.10.2024