Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
магістра
на тему

ПРОЕКТУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ХІМІЧНО-ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА Е-23 мг
Спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
_____/Даніїл ФЕДОРОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)
Керівник _____/ В'ячеслав МЕЛЬНИКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)
Рецензент_____/Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)
Секретар ЕК _____/Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____
(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____2024 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Даніїл ФЕДОРОВ

1. Тема «Проектування фотоелектричної електростанції з хімічно-гравітаційним накопичувачем енергії»
затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.
2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, що відображені у періодичних виданнях, наукових роботах, монографіях
4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ДОСВІДУ ГІДРАВЛИЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ КОМПЛЕКСУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ХІМІЧНО-ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ, РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ КЕРУВАННЯ ПОСТІЙНОЮ ШВИДКІСТЮ ГІДРАВЛІЧНОГО НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ВИСНОВКИ
5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):
_____Слайди презентації_____
_____

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024р.

Керівник _____ В’ячеслав МЕЛЬНИКОВ
(підпис) (ім’я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Данiїл ФЕДОРОВ
(підпис) (ім’я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка) _____ Данiїл ФЕДОРОВ
(підпис) (ім’я, прізвище)

Нормоконтроль _____ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім’я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 67, рисунків – 25; таблиць - 1; літературних джерел – 51.

В роботі було проведено ґрунтовний критичний аналіз сучасних технологій накопичення енергії гравітаційними акумуляторами.

Розроблено загальні принципи побудови комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії.

Розроблено технологічну схему комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії.

Досліджено параметри керування постійною швидкістю гідравлічного накопичувача енергії.

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ, ГРАВІТАЦІЙНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ, ЗАСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ, ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА, ГІДРОАКУМУЛЯТОРИ

1.

ABSTRACT

Pages of text – 67; pictures – 25; tables – 1; literary sources – 51.

The work has conducted a thorough critical analysis of modern technologies for energy storage using gravity accumulators.

The general principles of building a complex of a target photovoltaic station with a liquid gravitational energy storage system have been developed

The technological scheme of a complex of a target photovoltaic station with a liquid gravitational energy storage system has been developed

The parameters of constant speed control of a hydraulic energy storage system have been studied

PHOTOELECTRIC POWER PLANTS, GRAVITATIONAL ENERGY STORAGE SYSTEMS, SPEED REGULATION DEVICES, TECHNOLOGICAL SCHEME, HYDRAULIC ACCUMULATORS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1.АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ДОСВІДУ ГІДРАВЛИЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

1.1 Гідравлічне накопичення енергії вітрових та фотоелектричних електростанцій

1.2. Аналіз технологічних схем накопичення енергії

Висновки за першим розділом

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ КОМПЛЕКСУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ХІМІЧНО-ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

2.1 Хімічно-гравітаційний накопичувач енергії

2.2. Загальні положення

2.2. Складання технологічної схеми

Висновки за другим розділом

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ ПОСТІЙНОЮ ШВИДКІСТЮ ГІДРАВЛІЧНОГО НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

3.1 Загальні положення

3.2. Система контролю постійної швидкості та експериментальна випробувальна установка

3.2.1. Огляд системи

3.2.2. Схема управління

3.2.3. Експериментальний випробувальний стенд

3.3. Математична модель гідроакумулятора

3.3.1. Гідроакумулятор

3.3.2. Пропорційний клапан

3.3.3. Запобіжний клапан

3.3.4. Змінний двигун

3.3.5. Синхронний генератор

3.3.6. Датчик швидкості

3.3.7. Банк навантаження

3.4. Моделювання та експериментальне дослідження

3.4.1. Моделювання міцності на кроку потужності постійного навантаження

3.4.2. Експерименти міцності на змінному кроці потужності навантаження

Висновки за третім розділом

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

АСГД – асинхронізований гідрогенератор-двигун

АСГДК – асинхронізований гідрогенератор-двигун контрроторного виконання

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВЕС – вітрова електростанція

СГ– синхронний генератор

ГГ – гідрогенератор

ГЕС – гідравлічна електрична станція

ГАЕС – гідравлічна акумулюючи електрична станція

ККД – коефіцієнт корисної дії

СГД – синхронний гідрогенератор-двигун

ФЕС – фотоелектрична електростанція

ТЕО – техніко-економічне обґрунтування

КЗ – коротке замикання

ЛЕП – лінія електропередачі

ВСТУП

Актуальність дослідження полягає у тому, що фотоелектричні станції мають низку проблем при їх інтеграції до загальних мереж, а в автономному режимі вони повинні мати засоби накопичення енергії. Наразі ця проблема вирішується засобами акумулювання електричної енергії переважно в хімічних акумуляторах з приєднанням станції та акумуляторів до споживача через силові інвертори.

Вартість цього обладнання складає переважну долю загальної вартості фотоелектричної електростанції. Використання рідинного гравітаційного накопичувача енергії з двомашинним агрегатом дозволить відмовитися від силових інверторів у складі технологічного обладнання фотоелектричної електростанції а значною мірою здешевити її будівництво

Об'єктом дослідження є процес накопичення енергії в рідинних гравітаційних накопичувачах енергії

Предмет дослідження - технологічна схема комплексу цільової фотоелектричної електростанції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії

До завдання дослідження відносяться:

- Проведення аналізу сучасних технологій накопичення енергії гравітаційними акумуляторами
- Розробка загальних принципів побудови комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії
- Розробка технологічної схеми комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії
- - Дослідити параметри керування постійною швидкістю гідравлічного накопичувача енергії

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ДОСВІДУ ГІДРАВЛИЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

1.1 Гідравлічне накопичення енергії вітрових та фотоелектричних електростанцій

Традиційні централізовані енергосистеми мають суттєві недоліки, такі як значні втрати енергії через віддаленість деяких споживачів, недостатня гнучкість виробничого процесу через його низьку маневреність, відсутність належного регулювання споживання та тарифікації енергії. Ці недоліки зрештою призводять до збільшення витрат палива, рівня викидів CO2 та вартості виробленої енергії. У зв'язку з цим останнім часом все частіше використовуються локалізовані енергетичні системи, такі як мікромережі, розумні мережі, кластери розподіленої генерації та віртуальні електростанції. Такі системи можуть допомогти у вирішенні дуже важливих завдань, таких як оптимізація, стабілізація, гнучкість енергосистеми, інтеграція відновлюваних джерел енергії, «розумні» центри управління в процесі виробництва та розподілу енергії [1-3]. Накопичення надлишкової частини енергії для використання в години пік є необхідною процедурою для локальних енергосистем, для чого найчастіше використовуються електрохімічні, регенеративно - паливні та інші накопичувачі енергії.

В даний час метод гідравлічного накопичення енергії має найкращі характеристики серед накопичувачів. Вважається ефективним напрямком розширення можливостей використання відновлюваних джерел енергії, хоча вирішальними є наявність достатніх природних ресурсів, умов для будівництва водосховищ та отримання необхідного тиску [4, 5].

Розвиток інтеграції систем використання вітрових електростанцій (ВЕС) і гідроакумулюючих пристроїв дозволяє збільшити частку вітроенергетики в середньому до 20% у загальному енергоспоживанні [6]. Досліджуючи це

питання в залежності від енергоспоживання, автор [7] стверджує, що до 80% енергії вітру може бути реалізовано в системах електропостачання за умови використання гідроакумулюючої системи. Зростання коефіцієнта використання енергії вітру спостерігається також із збільшенням тривалості зберігання енергії, так, наприклад, до 90% енергії вітру може бути використано для накопичення води у верхній водоймі протягом 1 ... 3 діб [8].

У роботі [9] подано огляд перспектив розвитку гідравлічного накопичення енергії в світлі сталого розвитку. Відповідно до цього огляду, найбільш перспективним напрямком є гібридне використання гідроакумулюючих електростанцій (ГАЕС) малої потужності в комплексі з вітровими та сонячними електростанціями. Це підтверджується результатами досліджень, які свідчать про підвищення надійності та обсягів генерації енергії гібридними сонячними та вітровими електростанціями порівняно з їх роботою [10].

Автори [11-13] дійшли висновку, що комплексна система використання енергії вітру та ГАЕС за певних умов є найбільш економічно та технічно конкурентоспроможною технологією в різних географічних широтах.

У роботі [14] на прикладі використання енергії вітру розглядаються питання масштабної інтеграції відновлюваних джерел енергії з використанням ГАЕС в енергосистему Ірландії. Розглянуто основні ключові питання: капітальні витрати, оптимальні параметри та аспекти експлуатації. Результати дослідження показали, що ГАЕС дозволяє підвищити ефективність використання відновлюваних джерел енергії та зменшити експлуатаційні витрати.

Інтеграція ГАЕС в систему вітрової електростанції в Іспанії підвищує прибутковість цієї інтегрованої системи та мінімізує втрати енергії вітру [15].

У роботі [16-18] досліджено можливість максимального використання енергії вітру в поєднанні з існуючими автономними тепловими

електростанціями шляхом використання гідроакумулюючих електростанцій в ізольованій енергетичній системі островів Касос Карпатос, розташованих у південно-східній частині Егейського моря. Результати цього дослідження підтвердили економічну доцільність використання вітрогенераторів малої потужності для живлення насосних агрегатів гідроакумулюючих електростанцій навіть без урахування безсумнівних екологічних переваг.

Завдяки оптимальній інтеграції вітроенергетики з гідроакумулюючою електростанцією в озері Туркана (Кенія) гідравлічний накопичувач енергії вітротурбіни дозволив знизити дефіцит енергії до 46%, що еквівалентно отриманню доходу понад 10 тисяч доларів на день [19].

1.2. Аналіз технологічних схем накопичення енергії

Схема малопотужної ГАЕС з вітрогенератором наведена на рисунку 1.1.

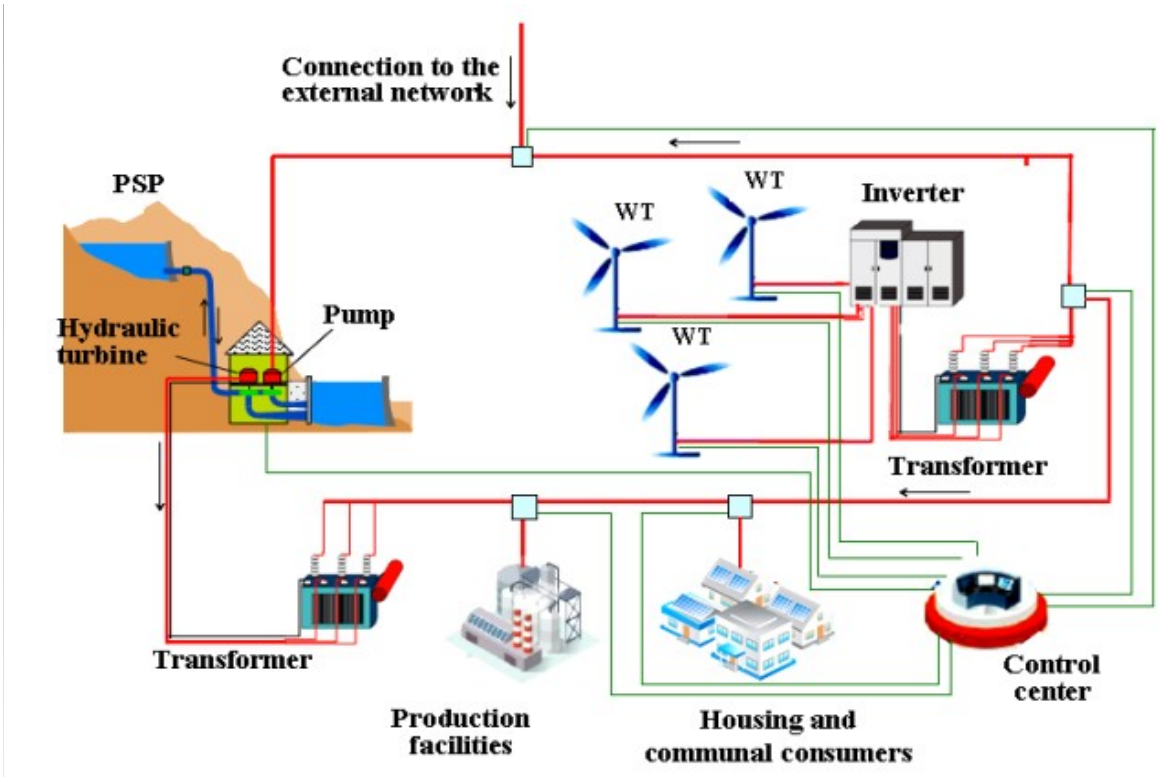


Рисунок 1.1 Схема ГАЕС малої потужності з ВЕС

За цією схемою основним виробником енергії є вітроелектростанція (ВЕС), що складається з кількох вітрогенераторів, яка в години мінімального енергоспоживання, маючи надлишкову потужність, подає електроенергію до насосних агрегатів (ГАУ) гідроакумулюючої потужності. установка для накопичення води у верхній водоймі. У години пік енергоспоживання, коли потужності вітрової турбіни недостатньо, вода з верхнього резервуара подається в гідротурбіни для вироблення енергії, а потім у нижній резервуар.

При відомих значеннях потужності вітрового потоку встановлену потужність ВЕС необхідно визначати за значеннями добового графіка навантаження. Якщо припустити, що енергія, яку виробляють вітрові турбіни, використовується за двома цілями: основна частина енергії спрямовується на потреби споживача, а надлишок використовується для накопичення, тобто для живлення ПУ. Середні графіки добового навантаження та енергії ВЕС з максимальною потужністю 100 МВт наведені на прикладі, наведеному на рисунку 1.2.

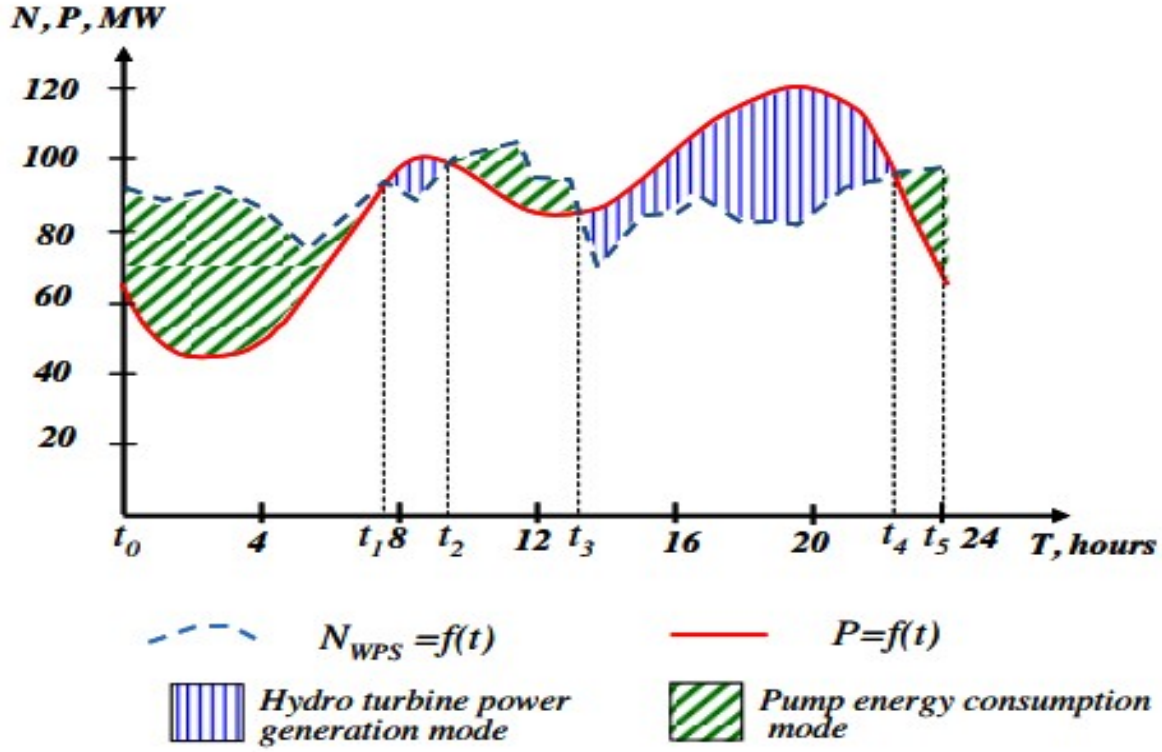


Рисунок 1.2. Графік роботи ГАЕС малої потужності з WPS

Для цього прикладу справедливий наступний вираз, який випливає з рівняння балансування щоденного навантаження та виробленої енергії.

$$Э_{WPS} \cdot \eta_E = \int_0^T P(t)dt, \tag{1}$$

де $Э_{WPS}$ – енергія, вироблена WPS за час T;

η_E – ефективність процесу передачі енергії споживачу;

P(t) – значення споживання навантаження в моменти часу t. Звідси ми можемо визначити середню потужність WPS за час T.

$$N_{WWS\,av} = \frac{\int_0^T P(t)dt}{T \cdot \eta_E}, \tag{2}$$

Наступне співвідношення може визначити встановлену потужність вітрової електростанції

$$N_{WPS} = N_{WT} \cdot n \tag{4}$$

де *n* – кількість вітрових турбін

Визначення типу, марки та кількості встановлених вітрогенераторів необхідно проводити на основі техніко-економічного обґрунтування з урахуванням місцевих умов на основі розгляду кількох варіантів.

Усі параметри мають відповідати умовам, зазначеним у (1)

Отримані значення потужності WPS N_{WPS} в залежності від часу *t* можуть бути використані для визначення режиму PSP з WPS (див. рис. 2. Графік $N_{WPS}=f(T)$).

Умова енергетичного балансу ГАЕС з WPS у режимі накачування, тобто коли є надлишок генерованої енергії, перевитрачений, описується наступним рівнянням балансу

$$\sum_{i=1}^{n} N_{\text{WPSi}} t_i - \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot T = \sum_{i=1}^{n} N_{\text{Pi}} t_i = Э_P \tag{5}$$

N_P, $Э_P$ – потужність та споживання енергії в режимі накачування

Звідси за відомою формулою визначаємо максимальний об’єм верхнього резервуара

$$V_{\max} = \frac{367 \cdot \eta_{\text{pum}} \left(\sum_{i=1}^{n} N_{\text{WPSi}} t_i - \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot t_i \right)}{H_{Pi}} \tag{6}$$

З (6) видно, що об'єм резервуара V визначається в прямій залежності від кількості енергії, яку необхідно акумулювати, і в оберненій залежності від тиску H_P.

Об'єм води у верхній і нижній водоймах протягом доби буде змінним і залежить від часу роботи ГАЕС в турбінному і насосному режимах. Для оцінки зміни об’ємів води використовуються графіки $W_{\text{lev}} = f(V)$, що характеризують залежність рівня води W_{lev} у водосховищах від їх об’ємів V.

Надлишкова потужність ГАЕС $N_P = N_{WPS} – P$ повинна бути використана для живлення ГАЕС, яка закачує об’єм води ΔV_H у верхню водойму, наприклад, згідно з графіком на рис. 2 протягом часу від t_0 до t_1, t_2 до t_3 і від t_4 до t_5.

При недостатній потужності ВЕС для покриття добового графіка навантаження нестача потужності $N_H = P – N_{WPS}$ компенсується переведенням ГАЕС в режим вироблення електроенергії з подачею води на гідротурбіни, які

вироблятимуть відсутню електроенергію. Наприклад, згідно з графіком на рис. 2, протягом часу від t_1 до t_2 і від t_3 до t_4. Результати розрахунків зручно подавати в табличному вигляді (табл. 1).

Таблиця 1.1. Визначення потужності ГАЕС

Time of day	Daily load of electric power P, kW	WPS power N_{WPS}, kW	Pumping power regime, N_P, kW	Turbine power, N_H, kW
t_{0-1}	$P_{i\,(0-1)}$	$N_{WPS\ i\,(0-1)}$	$N_{P\ i\,(0-1)}$	-
t_{1-2}	$P_{i\,(1-2)}$	$N_{WPS\ i(1-2)}$	-	$N_{Hi(1-2)}$
t_{2-3}	$P_{i\,(2-3)}$	$N_{WPS\ i(2-3)}$	$N_{P\ i\,(2-3)}$	-
t_{3-4}	$P_{i\,(3-4)}$	$N_{WPS\ i(3-4)}$	-	$N_{H\ i(3-4)}$
t_{4-5}	$P_{i\,(4-5)}$	$N_{WPS\ i(4-T)}$	$N_{P\ i(4-T)}$	-

Time of day	The amount of electricity in pumping mode, EN, kW/h	The amount of electricity in turbine mode, ET, kWh	Volume water supply upper reservoir, V_H, m^3	Volume water supply lower reservoir, V_T, m^3
t_{0-1}	$Э_{P(0-1)}$	-	$\Delta V_{P(0-1)}$	-
t_{1-2}	-	$Э_{H(1-2)}$	-	$\Delta V_{H(1-2)}$
t_{2-3}	$Э_{P(2-3)}$	-	$\Delta V_{P(2-3)}$	-
t_{3-4}	-	$Э_{H(3-4)}$	-	$\Delta V_{H(3-4)}$
t_{4-5}	$Э_{P(4-5)}$	-	$\Delta V_{P(4-5)}$	-

Кількість електроенергії визначається дискретним підсумовуванням добутків $N \cdot \Delta t$ за фіксовані інтервали часу, наприклад, за період t_{0-1} $Э_{P(0-1)} = \sum_{i=1}^{n} N_{Pi}$ і за період t_{1-2} $Э_{H(1-2)} = \sum_{i=1}^{n} N_{Hi} \cdot \Delta t_i$

Об'єм води, що подається ПУ у верхній резервуар у перший період роботи, можна визначити наступним чином.

$$\Delta V_{P(0-1)} = \frac{367 \cdot Э_{P(0-1)} \cdot \eta_{pum}}{H_{P(0-1)}}, \tag{7}$$

де $H_{P(0-1)}$, η_{pum} – напір та ККД ГАЕС в насосному режимі.

При поперемінній подачі та відборі води з водосховищ рівень води в них змінюється, а отже, значення тиску ГАЕС будуть різними і визначаються наступним співвідношенням [20]

$$H_{Hi,Pi} = H^{G}_{\mathrm{Hi},Pi} \pm \Delta H_i, \tag{8}$$

де ΔH_i – втрати тиску у водопроводах, які залежать від витрати насоса або турбіни Q і можуть бути розраховані за допомогою відомих методів гідравлічного розрахунку. У наведеній вище формулі знак (+) відповідає режиму накачування, а знак (-) режиму турбіни, H^G – геометричний напір.

Коли настане час енергетичної недостатності ВЕС $t_{1\text{-}2}$, ТН будуть зупинені, а гідроелектростанції (ГЕС) будуть введені в роботу з подачею об'єму води $\Delta VH_{(1\text{-}2)}$ (рис. 2 і таблиця 1)

$$\Delta V_{H(1-2)} = \frac{367 \cdot Э_{H(1-2)}}{H_{H(1-2)} \cdot \eta_{tur}}, \tag{9}$$

$H_{H(1\text{-}2)}$, η_{tur} – напір і ККД ГАЕС в турбінному режимі. Об'єм води у водоймах, що відповідає режиму роботи ГАЕС і ВЕС, наведений на рис. 2 можна визначити за максимальним значенням ΔV_H або ΔV_P згідно з табл.1.

Витрату води ГАЕС у турбінному та насосному режимах Q_H та Q_P у фіксовані моменти часу t_i можна визначити за значеннями потужностей та напорів за такими формулами.

$$Q_{\mathrm{Hi}} = \frac{N_{Hi}}{9{,}81 \cdot \eta_{tur} \cdot H_{Hi}}, \qquad Q_{\mathrm{Pi}} = \frac{N_{Pi} \cdot \eta_{\mathrm{pum}}}{9{,}81 \cdot H_{Pi}} \tag{10}$$

Одним із питомих енергетичних показників є коефіцієнт використання виробленої та спожитої енергії, який розраховується за наступним співвідношенням

$$K_t = (Э_{WPS} - Э_P + Э_H)/Э_{WPS} \quad (11)$$

Таким чином, можна підсумувати, що наведена методика дозволяє визначити параметри ГАЕС, максимально відповідні потужності ВЕС, і добове електричне навантаження.

Для цього комплексу розроблено функціональну схему виконання операцій програмного керування параметрами ГАЕС та ВЕС (рис. 1.3).

На першому етапі функціонування комплексу для вирішення питання «акумулювати або генерувати енергію» величина потужності N_{WPS} в момент часу t порівнюється з відповідною потужністю добового графіка навантаження P, внаслідок чого одна з трьох можливих операцій виконується.

а) $N_{WPS} = P$, при цьому ГАЕС не працює; навантаження покриваються енергією WPS.

б) При $N_{WPS} > P$ спостерігається надлишок енергії, яку необхідно направити на живлення ПУ для накопичення води у верхньому резервуарі.

в) Стан $N_{WPS} < P$ показує відсутність виробленої енергії, що передує запуску електростанції з подачею води з верхнього водосховища.

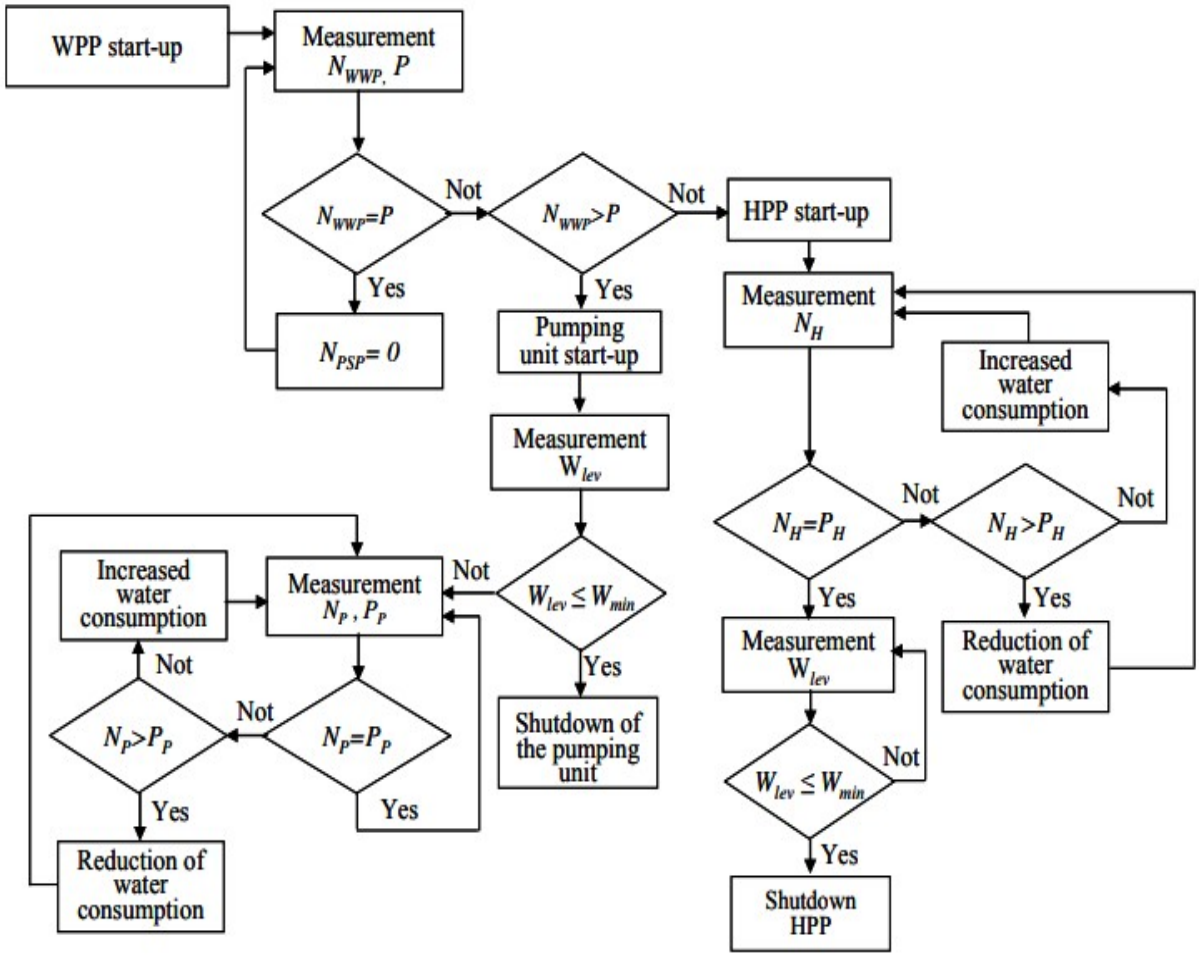


Рисунок 1.3. Функціональна схема PSP з WPS

Таким чином, основним завданням першого етапу є визначення часу та умов пусків ГЕС та ПУ за параметрами N_{WPS} та P.

Другий етап починається з пуску ПУ з повним або майже повним об'ємом води в нижньому резервуарі. Під час роботи насосів необхідно контролювати рівень води в нижньому резервуарі і потужність насоса для виконання наступних операцій:

- при зниженні рівня води до рівня мертвого об'єму ПУ відключається;

- припустимо, що NP не відповідає значенню PH, яке характеризується як різниця потужностей PH = NWPS. У такому випадку P (надлишкова потужність ВЕС, спрямована на живлення ПУ) виконується операція зі

збільшення або зменшення витрати води, що подається в ПУ до досягнення відповідності $N_P = P_P$.

На третьому етапі, коли $N_{WPS}<P$, для поповнення відсутньої частини навантаження запускається гідроелектростанція. Під час роботи ГЕС регулярно вимірюють N_H і порівнюють із значенням РН, що характеризує різницю $P_H = P - N_{WPS}$. Якщо ці значення рівні, це означає, що потужність електростанції достатня для покриття кривої навантаження, і перевіряється положення рівня води у верхній водоймі, тобто $W_{lev} \leq W_{min}$. При зниженні рівня води нижче W_{min} електростанція вимикається, а ГАЕС переходить в насосний режим. У разі невиконання $N_H \neq P_H$ подається команда збільшити або зменшити витрату води, що подається на електростанцію до досягнення балансу $N_H = P_H$.

Розглянемо певну локальну енергосистему з добовою потребою від 800 до 1050 МВт·год на базі ВЕС, що виробляє 850 ... 1100 МВт·год електроенергії на добу, графіки $N_{WPS} = f(T)$ і $P = f(T)$, з яких показано на рис. 2. За результатами розрахунків, проведених за характеристичними графіками $N_{WPS} = f(T)$ і $P = f(T)$, отримано наступні показники:

1. Кількість акумульованої енергії ЕР = 110…150 МВт·год, а виробленої енергії ЭН = 76…104 МВт·год.

2. Об'єм резервуара V=8 000 000…10 230 000 м3

3. Встановлена потужністьWPP N_{wps} =100 МВт

3. Встановлена потужність ПУ та НРР N_P = 55 МВт, N_H = 35 МВт.

4. Середній час роботи ПУ 12,5 год., ГЕС – 11,5 год.

5. Середній напір H_P =40,0 м, H_H = 38,5 м.

Результати розрахунків показують, що кількість акумульованої енергії становить 13,0…13,6 % від виробленої, для чого необхідно побудувати ГАЕС

потужністю 55 МВт з двома водосховищами об’ємом 8,0…10, 23 млн м3. Коефіцієнт використання енергії ВЕС складає 0,91 ...0,96, що є одним із найвищих показників для даного типу електростанцій [7].

Щоб відповісти на питання, наскільки це економічно вигідно, ми порівнюємо витрати на накопичення гідравлічної енергії з витратами на її зберігання літій-іонними акумуляторами, які є одними з найпоширеніших накопичувачів у 2019 році. За даними фінансової консалтингової компанії Lazard, цитується в [21], собівартість одиниці літій-іонних акумуляторів становить 204...275 $/кВт-год, а PSP — 177 $. ... 186 / кВт*год. Ці витрати включають вартість зберігання ємності протягом 4 годин для літій-іонних акумуляторів і 16 годин для гідроакумулюючої установки. При середніх значеннях цих питомих показників (наприклад, при їх різниці 60 $/кВт*год) економічний ефект від використання ГАЕС в розглянутій енергосистемі порівняно з літій-іонними акумуляторами становить 6,6...9 $, 0 мільйонів на день.

Висновки за першим розділом

1. Розроблено методику визначення параметрів комплексу ГАЕС і ВЕС, засновану на забезпеченні балансу виробленої, спожитої та акумульованої енергії в енергосистемі.

2. Розроблено функціональну схему програмного керування параметрами гідроакумулюючих електростанцій та вітрових електростанцій, що дозволяє досягти оптимального використання вітропотенціалу гідравлічним накопичувачем енергії.

3. Результати порівняльних розрахунків витрат на накопичення енергії показали економічну ефективність ГАЕС у порівнянні з літій-іонними акумуляторами, оцінену в 6,6…9,0 млн. доларів США на добу.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ КОМПЛЕКСУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ХІМІЧНО-ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

2.1 Хімічно-гравітаційний накопичувач енергії

Корисна модель належить до галузі енергетики і може бути застосована в системах генерації та накопичення електричної енергії.

Відомі гравітаційні накопичувачі енергії принцип яких заснований на переводі кінетичної енергії руху маси в потенційну енергію її спокою на більш високому рівні лінійного вертикального розміру. Гравітаційні накопичувачі енергії, використовують різні види робочого середовища об'єкту своєї маси (рідкісні, твердотільні, тощо…).

Недоліком таких накопичувачів є:

- великі лінійні розміри;
- велика маса робочого середовища;
- велика територія відчуження;
- обмежений час спуску робочого середовища в режимі видачі електричної енергії;
- складність регулювання процесу видачі енергії.

Відомі хімічні акумулятори електричної енергії, які мають значну масу з обмеженому об'ємі.

Дана корисна модель покликана вирішити наступні технічні задачі:

- оптимізувати режим використання об'єму і маси хімічних акумуляторів електричної енергії шляхом їх використання в якості робочого середовища об'єкту маси твердотільного гравітаційного накопичувача енергії;
- поліпшити енергетичні показники хімічних акумуляторів електричної енергії шляхом додаткового використання їхньої маси в якості ресурсу акумулювання енергії.

В основу корисної моделі поставлено задачу удосконалення конструкції батареї хімічних акумуляторів шляхом спорудження на базі їх маси твердотільного гравітаційного накопичувача енергії.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, де на фіг. 1 зображено конструкцію хімічно-гравітаційного накопичувача енергії, а на фіг. 2 його узагальнену технологічну схему.

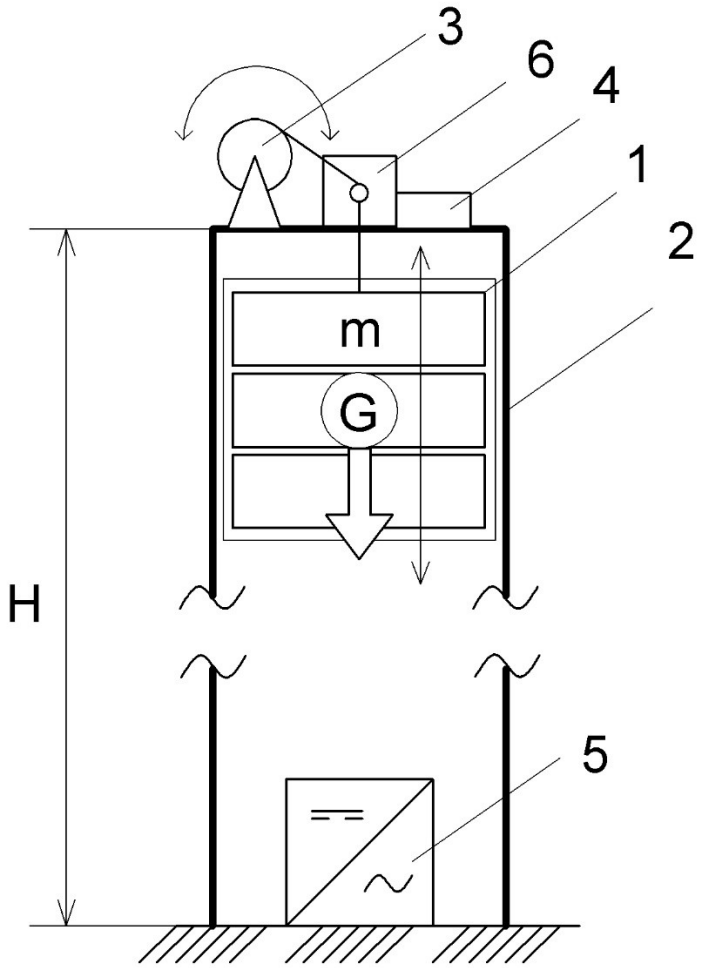
Хімічно-гравітаційний накопичувач енергії містить батарею хімічних акумуляторів 1, яка змонтована як єдиний блок вертикального руху, опорні конструкції вежі гравітаційного накопичувача 2, оборотну машину постійного струму 3, яка працює в режимах генератора та двигуна, систему управління оборотною машиною постійного струму 4, інвертор - контролер заряду 5, механізм підняття вантажу (робочого середовища об’єкту маси гравітаційного накопичувача енергії) 6.

Елемент 1 розташований на єдиній основі, що дозволяє використовувати його масу як робоче середовища твердотільного гравітаційного накопичувача енергії.

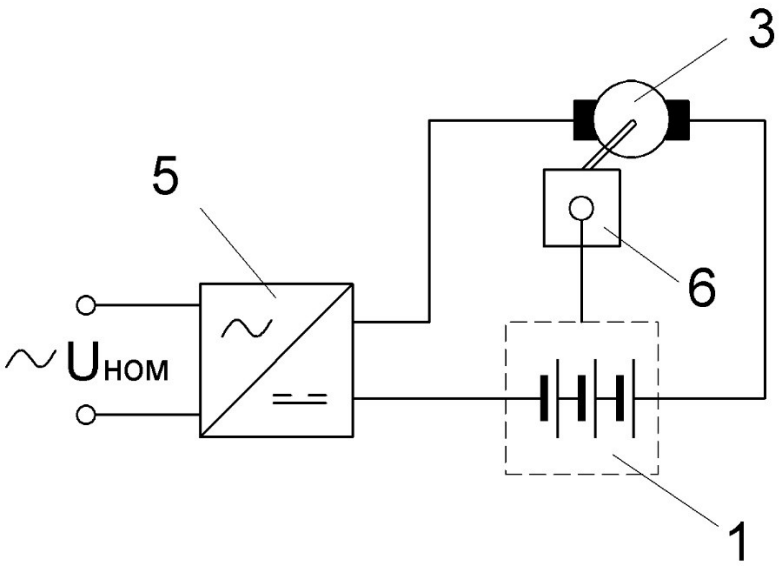
Інвертор-контролер заряду 5 заряджає батарею хімічних акумуляторів 1 до повного заряду, після чого починає живити оборотну машину постійного струму 3, яка в цей час працює в режимі двигуна та підіймає вгору єдиний блок вертикального руху з хімічними акумуляторами 1. Таким чином обсяг заощадженої електричної енергії в батареє хмічних акумуляторів збільшується на величину потенційної енергії їх маси, піднятої на висоту Н. В разі повної або часткової розрядки батареї хімічних акумуляторів оборотна машина постійного струму переходить в режим генератора та починає заряджати батарею хімічних акумуляторів.

Застосування даної корисної моделі дозволяє підвищити енергетичну ємність хімічних акумуляторних батарей на величину потенційної енергії їх маси, яка піднята на висоту Н.

Джерело інформації.



Фіг.1



Фіг.2

2.2. Загальні положення з гравітаційного рідинного зберігання енергії

Несприятливі наслідки глобальної зміни кліматичних умов обумовлені до втручання людини в природну екосистему життєвого циклу змусили людей звести до мінімуму таку діяльність, яка веде до планета до знищення. Люди з різних верств суспільства усвідомили наслідки використання викопного палива та є розвиток і використання чистих і відновлюваних джерел енергії.

Ці джерела енергії включають вітер, сонячну фотоелектричну, сонячну теплові, геотермальні, гідроелектростанції, біопаливо, біомаса, хвилі, припливи, та ін З них вітрові та сонячні джерела зайняли провідне місце завдяки їх технологічна зрілість і комерційне прийняття. Глобальне розгортання та інвестиції цих джерел зростають з року в рік, як видно з літератури. Крім того, висока вартість виробництва, залежність від викопного палива та екологічні міркування були потужним рушієм зростання використання потенціалу відновлюваної енергії протягом останнього десятиліть.

Згідно з останнім оновленням, глобальні інвестиції в розвиток і використання відновлюваних джерел енергії 244 млрд доларів США в 2012 році порівняно з 279 млрд доларів США в 2011 році.

На рис. 1 показано тенденцію встановлених потужностей відновлюваної енергетики для світових і найкращих країн. Наприкінці 2012 року глобальна встановлена потужність відновлюваних джерел енергії досягла 480 ГВт, тоді як Китай залишався світовим лідером із внеском у 90 ГВт.

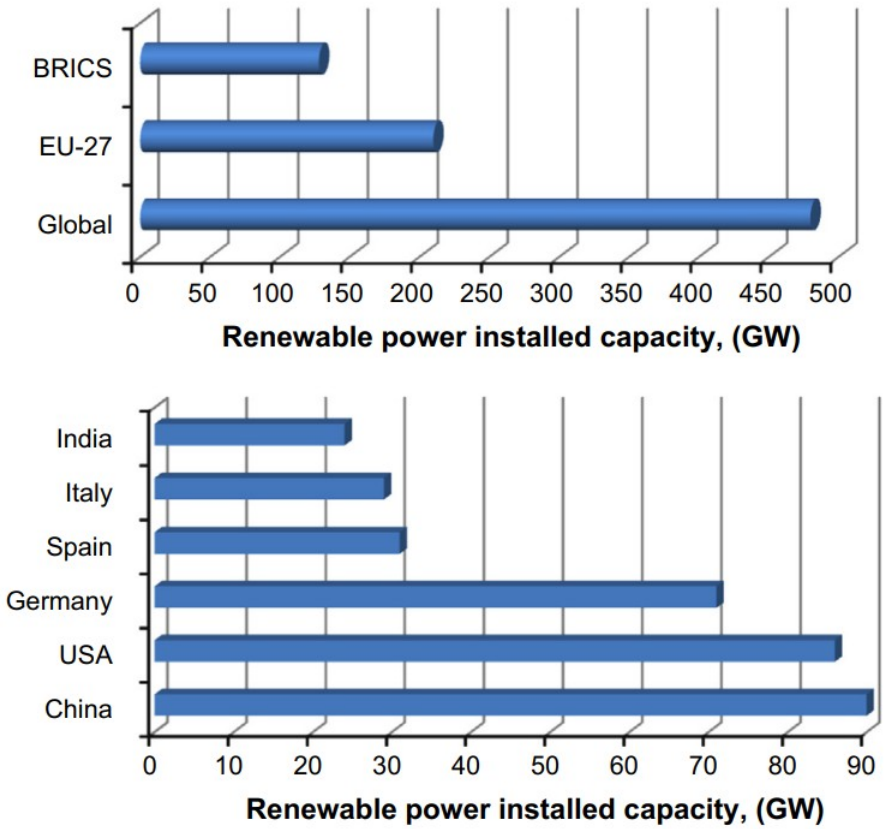


Рис. 2.1 Динаміка зростання потужності відновлюваних джерел енергії

США та Німеччина з встановленою потужністю 86 та 71 ГВт відповідно. У глобальній потужності 480 ГВт внесок ЄС-27 становить 210 ГВт і країни БРІКС (Бразилія, Росія, Індія, Китай і Південна Африка) 128 ГВт. Глобальна встановлена потужність вітроелектростанції зросла на 12,4% до понад 318 ГВт у 2013 році через більшу Китаю та Канади, як показано на рис. 2.2. Однак, у 2013 році потужність установок сповільнилася майже до 35,5 ГВт, на 10 ГВт менше, ніж встановлено у 2012 році. Китаю на кінець 2012 року встановлена вітрова потужність становила 75,3 ГВт досягла 91,4 ГВт у 2013 р. Іншим основним фактором вітру є енергетичних потужностей, Канада, додала 1,6 ГВт нових потужностей. Європи У порівнянні з 2013 встановлена потужність вітрових вітрів зросла майже до 121,5 ГВт до 110 ГВт на кінець 2012 р. Сукупна встановлена фотоелектрична потужність у світі потужність перевищила позначку в 100 ГВт, досягнувши трохи більше 102 ГВт при кінець 2012 року, Weblink3 [5], як показано на рис. 3. Глобальна сукупна встановлена потужність фотоелектричної системи в 2011 році становила 71 ГВт. Ця ємність

здатний щорічно виробляти стільки електроенергії, скільки 16 вугілля електростанції або ядерні реактори потужністю 1 ГВт кожна. Кожен рік ці фотоелектричні установки зберігають понад 53 мільйони тонн CO_2 еквівалент парникових газів, що потрапляють в атмосферу.

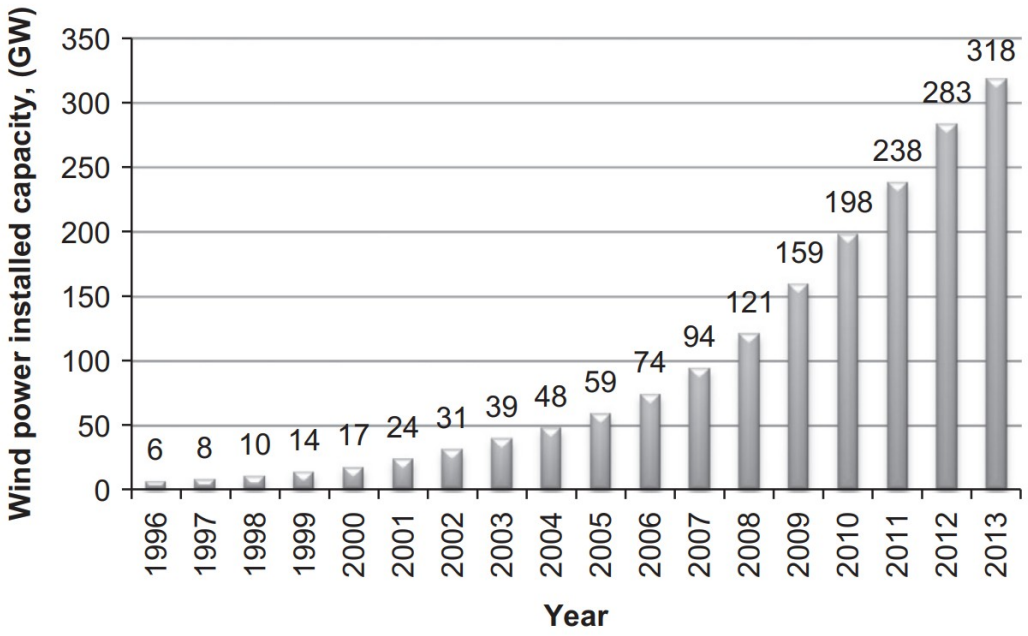


Рис. 2.2. Порічна динаміка зростання встановленої потужності вітрових електростанцій

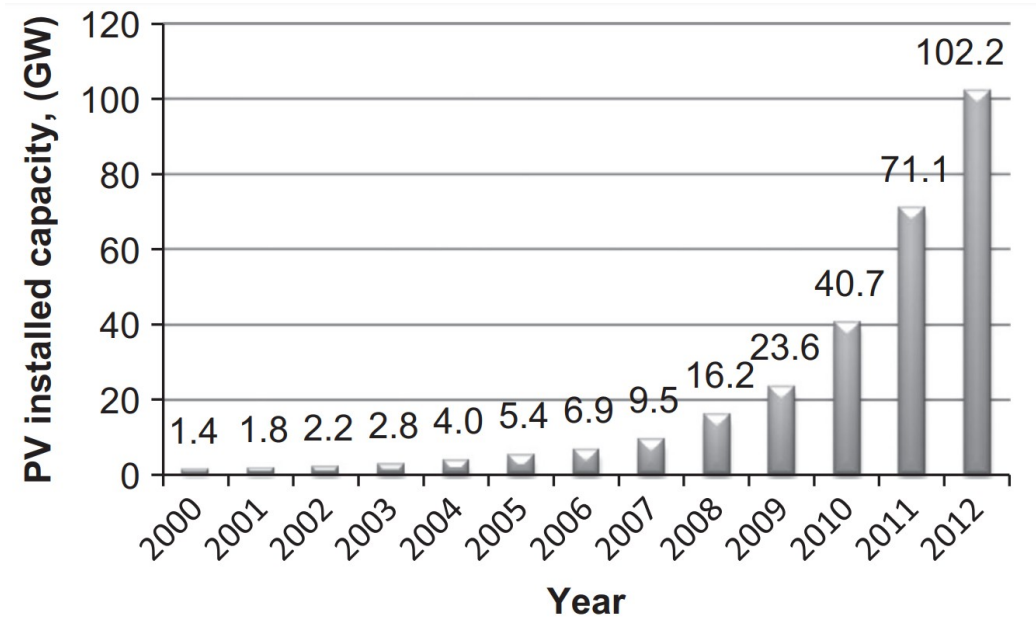


Рис. 2.3. Порічна динаміка зростання встановленої потужності фотоелектричних електростанцій

Загальна встановлена потужність ГЕС у 2012 році досягла 990 ГВт до 960 ГВт у 2011 році, збільшення на 3,12%. Зазвичай відновлювані джерела енергії природно переривчасті з різним ступенем переривчастості. Сонячна енергія є менш переривчастий порівняно з вітром, оскільки швидкість вітру висока коливання метеорологічного параметра. Цей мінливий характер чисті джерела енергії негативно впливають на потужність безпосереднього виробництва, що стає проблемою для регулярного та безперебійного постачання електроенергії кінцевому споживачу та для стабільності мережі.

Таким чином, опція масового зберігання енергії є відповіддю, і вона вже є визнано засобом зменшення попиту на викопне паливо погіршення навколишнього середовища. У випадку ізольованих острівних сіток де технічні обмеження накладаються звичайними генеруючими установками та обмеженим розміром систем, варіант зберігання енергії вважається найефективнішим засобом для посилення вітру проникнення.

Щоб звести до мінімуму, потрібні відповідні масові накопичувачі енергії втрат енергії вітру, захист інтересів інвесторів і створення вітрової енергії як джерела виробництва електроенергії. Електричний мережі зазвичай зберігають 8–10% додаткової ємності на додаток до потужність на лінії, щоб впоратися з миттєвими потребами в електроенергії. Забезпечення PHES в ізольованих мережах, подібних до тих, що знаходяться в островів, здається перспективним варіантом для вирішення як високий вартість виробництва електроенергії та безперервне збільшення потужності попиту, що виникає в цих областях.

Досліджували здатність грецьких енергосистем поглинати відновлювану енергію та необхідність насосних акумулюючих систем. Результати показали, що для поступового збільшення змінної вироблення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) необхідна гідроакумуляція. однак, доцільність використання гідроакумулюючих систем не була доведена в проміжні сценарії інтеграції ВДЕ. Сприятливий і реалістичнийпосіб

впровадження гідроакумулювання в острівних системах заснований на концепція PHES, що складається з вітрових електростанцій та сховищ, діючи злагоджено. З цих причин системи накопичення енергії, здатні відновлювати відкинутий вітер енергії за економічно ефективних умов широко застосовуються, досягаючи максимального використання енергії вітру як на національному, так і на рівні спільноти. Салліван та ін. досліджували енергетичну систему США і знайшли що зберігання може призвести до збільшення встановленої вітрової енергії, щоб зробити це достатньо цінним. вивчав додавання накопичувачів енергії стисненого повітря (CAES) до ендогенних інвестицій модель. Дослідження показало, що при певних рівнях потужності вітру і капітальні витрати, CAES може бути економічно вигідним у Німеччині для великих масштабів використання вітрової енергії через змінний характер вітру. Інь та ін. запропонували мікрогібридну систему накопичення енергії, що складається гідроакумулюючої станції та накопичувача енергії стисненого повітря.

Включає гібридну систему, що діє як турбіна з мікронасосом (MPT). Два резервуари, один відкритий для повітря, а інший підданий стисненому повітрю. MPT використовує надлишкову потужність з мережі для насоса вода, яка, у свою чергу, стискає повітря, і зрештою енергія перетворюється на внутрішню енергію повітря. Енергія в потім випускається повітря для руху води, що проходить через MPT генерувати електроенергію, коли енергопостачання з мережі недостатнє. Мейбом та ін. обговорювали переваги використання тепла зберігання для інтеграції вітру, тоді як Mathiesen і Lund досліджував різні технології інтеграції вітру, показуючи, що теплове зберігання може бути дуже корисним. Ummels та ін. вивчав вплив зберігання на роботу системи протягом одного року в Нідерланди. Виявилося, що хоч пам'яті стало більше життєздатним для системи зі збільшенням рівня енергії вітру, це ніколи не виявився найкращим варіантом для розглянутої системи.

Гідроакумулюючі станції є засобом зменшення різниці між піком і долиною та збільшення використання енергії вітру, сонячна фотоелектрична енергія та інше виробництво чистої енергії до електричних мереж. Найбільш перспективними є гідроакумулюючі станції. Вони підходять до числа джерел пікової потужності і, таким чином, є одним із основних інвестицій Китаю в майбутнє. Згідно з Zeng на інш., для широкомасштабного розвитку чистих джерел енергії, таких як енергія вітру, яка є дуже переривчастою, потреба в піку потужність системи значно зростає.

У нинішньому сценарії розробка ефективної та екологічно безпечної системи накопичення енергії (СНЕ) є важливим питанням спрямовані на захист суспільства від стихійних лих.

Попит на СНЕ зростає для всіх типів застосувань, таких як системи електропостачання віддалених зон (наприклад, морські платформи, телекомунікаційні установки), системи електропостачання під напругою, аварійне резервне копіювання, мобільні додатки та, нарешті, для підключених до мережі великих електростанцій з відновлюваної енергії. Постачання електроенергії для віддалених районів стає більш привабливою завдяки прогресу в фотоелектричній (PV), концентрованій сонячній тепловій енергії системи (CSP) і технології виробництва вітрової енергії розробка ЕСС. За словами Лі та Гуші потужне промислове зберігання електроенергії є критично важливою технологією, необхідною для відновлюваної енергетики, якщо вона хоче стати основним джерелом диспетчеризованої електроенергії базового навантаження. Крім того, вони вказали, що системи зберігання енергії коштують близько 30% загальної вартості системи відновлюваного енергопостачання. Крім того, за останніми оцінками асоціації зберігання електроенергії (AZE) і KEMA, більше 100 000 додаткових робочі місця будуть створені до 2028 року в секторі зберігання енергії.

Насосні гідроелектростанції зберігають енергію у формі потенційної енергії води, яка викачується з нижнього резервуару до резервуара вищого

рівня. У цьому типі системи низька вартість електрики електроенергія (електроенергія в непіковий час) використовується для запуску насосів для підвищення вода з нижнього резервуара у верхній. Під час у періоди високого споживання електроенергії накопичена вода вивільняється гідротурбіни для виробництва електроенергії. Реверсивні вузли турбіни/генератора діють як насос або турбіна, якщо необхідно. Типовий концептуальні гідроакумулюючі (ГЕС) системи с варіанти вітрової та сонячної фотоелектричної енергії для перенесення води від нижнього до верхнього резервуара показані на рис. 2.4 і 2.5 відповідно. Методика на даний момент є найбільш економічно ефективним засобом зберігання великої кількості електроенергії, але капітальні витрати і наявність відповідного географічного положення є вирішальним фактором.

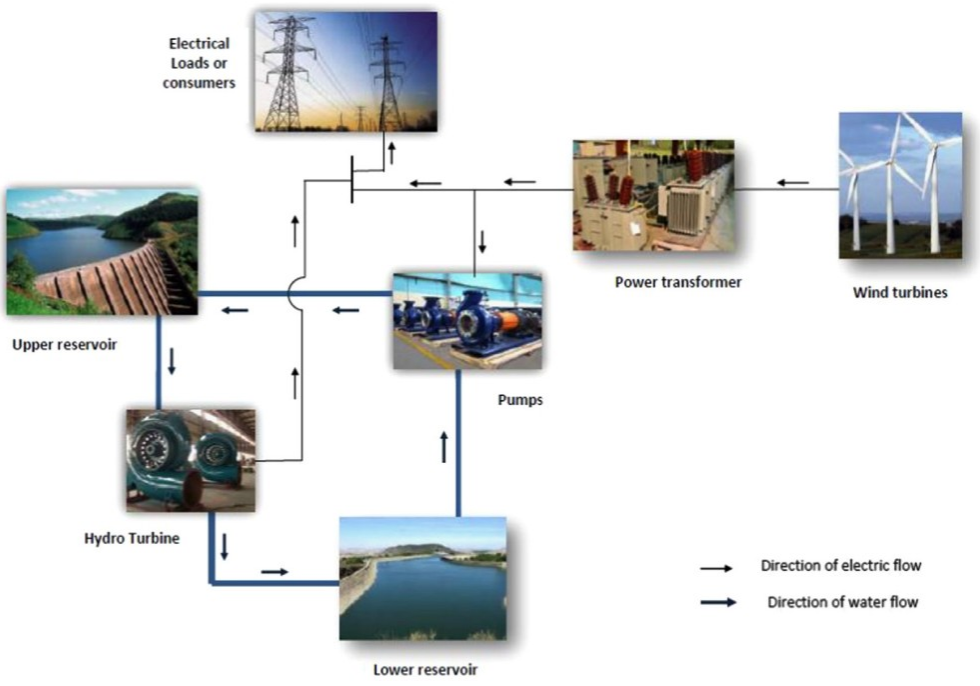


Рисунок 2.4 Структурно-логічна схема електроенергетичної системи з гравітаційним рідинним накопиченням енергії

Конструкція майже кожної електростанції ПЕС сильно залежить на характеристики сайту. Місце з достатньою кількістю води є кажуть, що добре для розвитку заводу PHES, якщо рельєф і геологія району сприятливі.

Гідроакумулюючу систему вважають найбільш перспективною технологія підвищення рівня проникнення відновлюваної енергії в енергетичних систем і особливо в малих автономних острівних мережах. Вітрові та гідроакумулюючі системи називаються гібридними станцій, є реалістичним і здійсненним варіантом досягнення високого поновлювані проходки за умови, що їх компоненти є правильного розміру. Система ПЕС є гідроелектростанцією система генерації, що використовується на електростанціях для зменшення пікового навантаження.

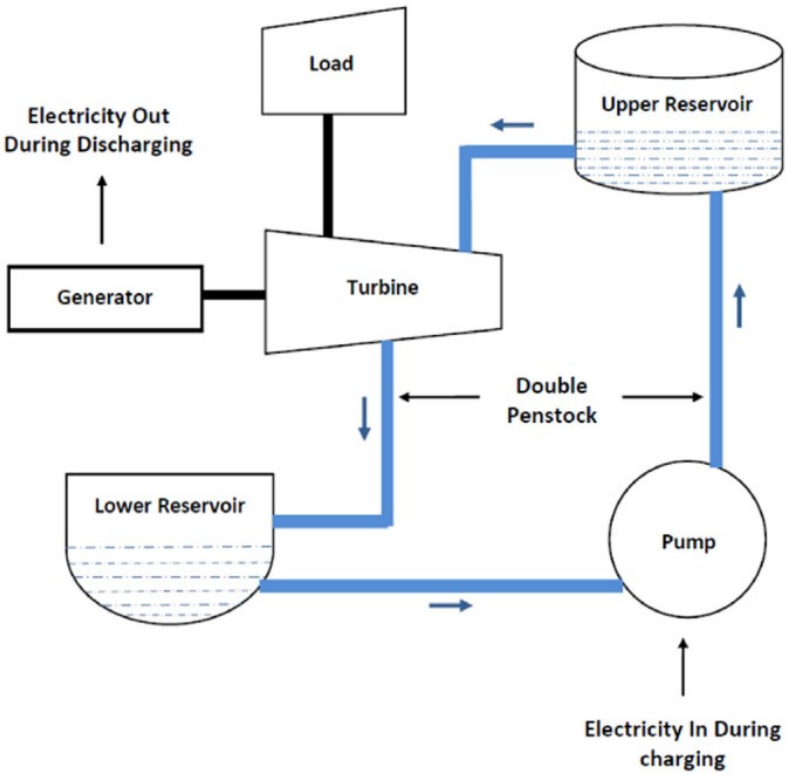


Рисунок 2.5 Принципова технологічна схема гудроакумулюючої електростанції

Схеми гідроакумулювання в даний час забезпечують найбільш комерційно важливий засіб накопичення енергії великої мережі покращити коефіцієнт добової потужності системи генерації.

Відносно низька щільність енергії систем ГАЕС вимагає дуже великих водойм або великої різниці у висоті між верхнім та нижнім б’єфом.

Насосна акумуляція є найбільш потужною формою мережевого накопичення енергії доступно і станом на березень 2022 р. Як повідомляє Дослідницький інститут електроенергетики (EPRI) ГАЕС займає більше 99% маси потужність зберігання в усьому світі, що становить близько 127 ГВт.

Відновлювані та чисті джерела енергії, такі як вітер, сонце, хвилі, припливи, біомаса, муніципальні відходи тощо мають періодичний характер і, отже, брак у виробництві безперервної та фірмової потужностей.

З них вітер є метеорологічним параметром, що сильно коливається змінюється на погодинну, щоденну, щотижневу, місячну та щорічну. Отже, підключити енергію вітру до мережі та забезпечити якісну електроенергію постачання, потрібні великі системи зберігання енергії. Сонячна радіація це, однак, більш відомі джерела енергії та менше коливається але працює тільки в денний час. З точки зору якості електроенергії сонячна енергія забезпечує відносно більш надійну енергію і може бути відданим і керованим. У цьому випадку відносно менша енергія системи зберігання можуть бути корисними для забезпечення безперервної та якісної роботи потужність. Згідно Хіно і Лежену, насосні ГАЕС установки мають ряд переваг, таких як:

1) гнучкий старт/зупинка та швидка швидкість реакції;

2) здатність відстежувати зміни навантаження та адаптуватися до різких змін навантаження;

3) може модулювати частоту і підтримувати стабільність напруги.

Усе це означає, що ГАЕС є корисним інструментом в системі електроенергії, як вказали Назарі та ін. і Міттереггер і Пеннінгер, Кір і Чепмен провели обстеження і виявили, що насосну ГЕС бачили більшість як непомірно дороге, але майже повсюдно розглядалося як технічно здатний забезпечити відновлювану підтримку та пік адекватність потужності. У сучасному світі з ростом усвідомлення серед людей є чисті та відновлювані

джерела енергії заохочується та використовується в усьому світі. Зважаючи на ці зростають тенденції використання періодичних джерел енергії є, і буде більша потреба в гнучкості в сучасні системи передачі та розподілу енергії.

Зважаючи на велику інтеграцію енергії вітру в електричну мережу, низка питань, описаних нижче, вимагається адресований:

- Потужність мережі та профіль напруги не повинні перевищувати визначені межі.
- Перевантаження мережі.
- Вплив змінних енергетичних ресурсів (VER) на загальну потужність передача завдяки інтеграції вітру.
- Обробка гармонік, створених додаванням енергії вітроелектростанцій в мережу.
- Показники перехідної стійкості системи для нормального і аварійні умови та визначення передачі потужності рівні обмежені обмеженням стабільності через додавання взаємозв'язки VER.
- Обробка змін імпедансів мережі через вітроелектростанцію підключення до мережі, а потім його вплив на пульт дистанційного керування контрольно-сигнали.
- Питання захисту мережевого захисного обладнання на електромережі через для додавання енергії вітру в мережу.
- Проблеми стабільності в мережах які можуть виникати через динамічну поведінку вітрових електростанцій, підключених до мереж.

Для пом'якшення може знадобитися оцінка капіталовкладень несприятливий вплив на систему, якщо така є, включаючи обладнання, лінії електропередачі та спеціальну/високошвидкісну систему захисту.

Перш за все, важливо розуміти, що відновлювані джерела енергії – це енергія, яка отримується з природних ресурсів, що постійно відновлюються. До них належать сонячна енергія, вітрова енергія, геотермальна енергія, енергія біомаси та гідроенергія. На відміну від традиційних викопних джерел,

таких як вугілля, нафта і газ, відновлювані джерела енергії не виснажуються і мають мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Однак, незважаючи на очевидні переваги, розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні стикається з низкою серйозних проблем. Однією з головних проблем є недостатній рівень державної підтримки та фінансування. Інвестиції в цей сектор часто вимагають значних коштів, а відсутність стабільних і зрозумілих правил гри може відлякувати потенційних інвесторів.

Ще одна важлива проблема – це технологічна відсталість. Хоча в Україні є окремі приклади успішного використання сучасних технологій, загалом рівень технічного оснащення і досліджень відстає від провідних світових стандартів. Це ускладнює можливість конкурентоспроможного розвитку відновлюваної енергетики на національному рівні.

Крім того, важливо зазначити низький рівень енергоефективності. Часто використання відновлюваних джерел енергії супроводжується значними втратами через недостатньо розвинуту інфраструктуру та застарілі енергосистеми. Підвищення рівня енергоефективності є однією з ключових задач для забезпечення успішного впровадження відновлюваних джерел енергії.

Ще одна критична проблема – це відсутність кваліфікованих кадрів. Відновлювана енергетика потребує висококваліфікованих фахівців, які здатні працювати з новітніми технологіями та забезпечувати ефективне управління енергетичними проектами. В Україні є потреба у розвитку освітніх програм, що готуватимуть таких спеціалістів.

Соціально-психологічні аспекти також не можна залишати поза увагою. Суспільство часто має стереотипи щодо відновлюваних джерел енергії, що може гальмувати їх впровадження. Проведення просвітницької роботи та

інформування громадськості про переваги і можливості відновлюваних джерел енергії є важливою складовою розвитку цього сектора.

І на завершення, одним з найбільших викликів залишається питання інтеграції відновлюваних джерел енергії в існуючу енергетичну систему. Це вимагає розробки нових технологій для управління енергосистемою, а також створення умов для гнучкого і стабільного функціонування енергетичного ринку.

З огляду на вказані проблеми в роботі пропонується до використання дешева, автономна, цільова фотоелектрична станція з обмеженим набором високотехнологічного обладнання, яка не потребує висококваліфікованих кадрів для її монтажу та експлуатації. Це відповідає сучасним українськи реаліям в галузі всебічного використання усіх доступних видів енергії.

Запропонована нами схема використання фотоелектричних модулів значною мірою збільшить енергоефективність систем локального водопостачання та дозволить з мінімальними витратами впроваджувати технології відновлюваної енергетики.

Науково-технічною новизною запропонованої нами цільової фотоелектричної електростанції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії і принциповою відмінністю від аналогів є використання водонапірних веж (рис. 2.6, 2.7) у якості основних споруд для монтажу фотоелектричних модулів та використання води у якості робочого середовища вантажу гравітаційного накопичувача енергії. Таким чином уся енергія, яка генерується фотоелектричними модулями витрачається на підйом води до резервуару водонапірної вежі. А генерація електричної енергії відбувається при використанні цієї води за її прямим призначенням.



Рисунок 2.6. Зовнішній вигляд водонапірної вежі типового виконання

Запропонований принцип використання енергії Сонця позбавляє фотоелектричну електростанцію таких коштовних елементів як інвертор та акумуляторні батареї. Це значною мірою здешевлює її будівництво та спрощує подальшу експлуатацію. Проте така фотоелектрична станція є виключно цільовою та розрахована перш за все для потреб водопостачання, а генерація

електричної енергії є додатковою можливістю використання агрегатів та основних споруд системи водопостачання.

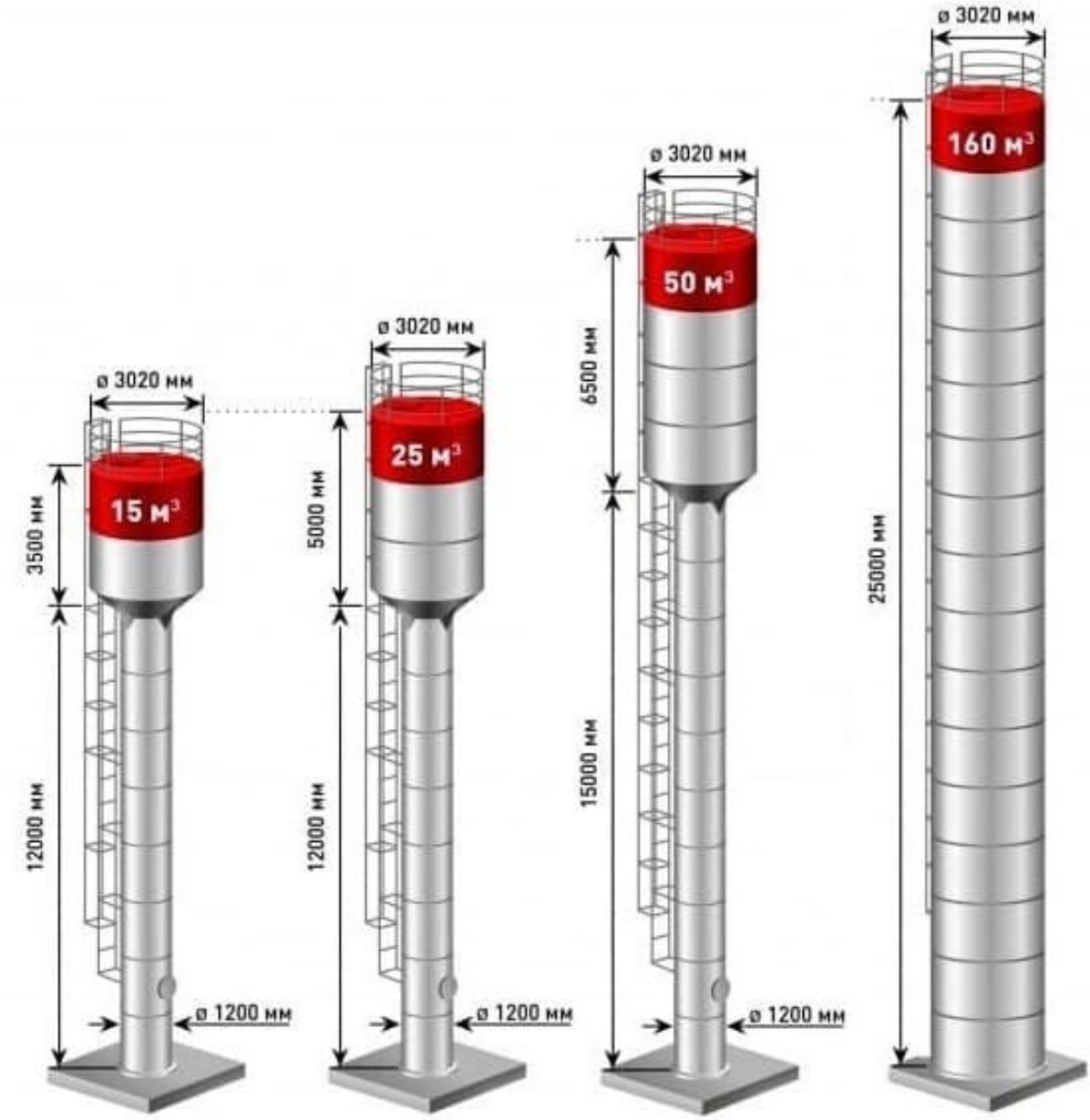


Рисунок 2.7. Типові моделі водонапірних веж

2.2. Складання технологічної схеми

Технологічна схема комплексу фотоелектричної електростанції з гравітаційним рідинним накопичувачем енергії яка пропонується в роботі наведена на рисунку 2.8.

Відповідно до вказаної схеми уся електрична енергія, яка генерується фотоелектричними модулями 1 використовується для роботи привідного двигуна постійного струму 5, який обертає насос-нагнітач 4, який перекачує рідину (воду) з резервуару нижнього б'єфу 8 до резервуару верхнього б'єфу 2.

Відповідно до запропонованої в роботі галузі використання вказаного комплексу у якості нижнього б'єфу може точка водозабору або свердловина, а у якості верхнього б'єфу – резервуар водонапірної вежі.

Таким чином енергія сонячного випромінювання цільовим образом використовується для водопостачання споживачів води. Це є першим ступенем перетворення енергії. Під час відпустки води з резервуару водонапірної вежі до споживачів маса води перетворює свою потенційну енергію спокою на кінетичну енергію руху. В цьому режимі за допомогою гідравлічної турбіни 6 та синхронного гідрогенератора 7 відбувається генерація електричної енергії і гравітаційний накопичувач переходить в режим видачі електричної енергії. Ця енергія може бути корисно спожита на потреби споживачів, які розташовані поруч.

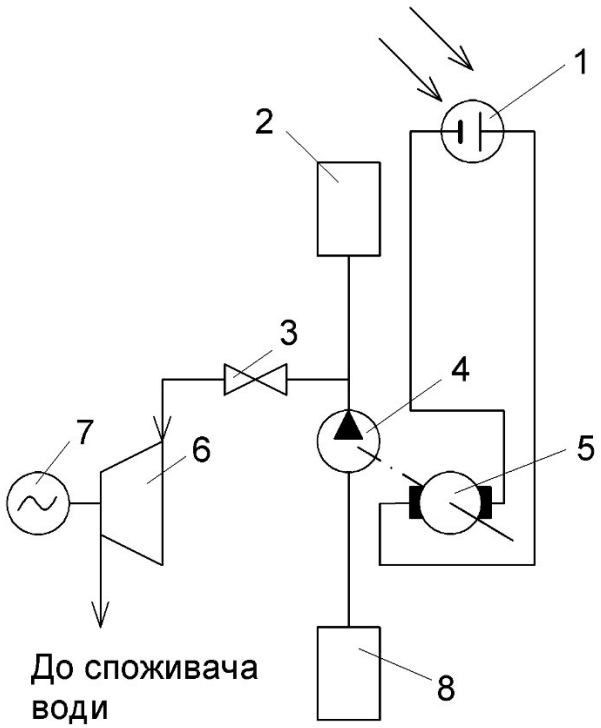


Рисунок 2.8 Технологічна схема комплексу фотоелектричної станції з гравітаційним рідинним накопичувачем енергії

1 – фотоелектричні модулі, 2 – резервуар верхнього б’єфу, 3 – запірна засувка, 4 – насос, 5 – двигун постійного струму, 6 – гідротурбіна, 7 – гідрогенератор, 8 – резервуар нижнього б’єфу.

Висновки за другим розділом

Проведено огляд актуальних проблем впровадження альтернативних джерел енергії в енергетичний сектор України

Визначено характерні умови впровадження відновлюваних джерел енергії та їх інтеграції до об’єднаної енергосистеми України

Розроблено технологічну схему цільової фотоелектричної електростанції з гравітаційним рідинним накопичувачем енергії.

Визначено перелік обладнання та складено відповідну комплектацію комплексу фотоелектричної електростанції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ ПОСТІЙНОЮ ШВИДКІСТЮ ГІДРАВЛІЧНОГО НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

3.1 Загальні положення

Через надмірну експлуатацію та використання традиційних джерел енергії, таких як вугілля, весь світ повинен зіткнутися з енергетичною кризою та проблемами забруднення навколишнього середовища. Ці проблеми повинні бути вирішені шляхом широкомасштабного використання відновлюваної енергії. Завдяки технологічному прогресу вітряних турбін за останні роки, виробництво вітрової енергії є хорошим вибором для задоволення постійно зростаючого попиту на енергію [22]. Загальна світова вітроенергетична галузь на кінець 2016 року становила 486,8 ГВт, що означає загальне зростання ринку більш ніж на 12 відсотків. Загалом світова вітрова енергетика встановила 54,6 ГВт у 2016 році. У Китаї до електромережі країни було додано 23 370 МВт нових потужностей [23]

Відповідно до системи трансмісії, прийнятої вітряною турбіною, вітряні турбіни науково класифікуються на традиційний зубчастий привід, прямий привід без коробки передач і гідростатичну передачу [24]. У звичайній вітротурбіні з редукторним приводом редуктор є ключовим компонентом системи перетворення енергії вітру, який має більший відсоток відмов і потребує регулярного ремонту [25]. Коробка передач створює механічний шум через відсутність профілактичного обслуговування, що викликає роздратування у людей, що живуть поблизу [26,27]. Вітротурбіна з прямим приводом без коробки передач знімає коробку передач, замінюючи її генератором з постійним магнітом. Однак це дорожче порівняно з генераторними системами з редукторами [28]. Вітрові турбіни, обладнані гідростатичною передачею, називаються гідравлічними вітрогенераторами. Дослідження та розробки гідравлічних вітряних турбін привернули величезну увагу дослідників у всьому світі, оскільки вони мають унікальні переваги, такі як високе співвідношення потужності до ваги, своєчасна зміна передавального

числа та усунення системи перетворювача [29]. Никранджбар створив математичну модель вітрової турбіни з гідростатичною передачею зі змінною швидкістю в програмному забезпеченні MATLAB. Моделювання було досягнуто за середньої швидкості вітру 9 та 16 м/с та 12% інтенсивності вітру турбулентності. Результати моделювання показали, що гідравлічна вітрова турбіна мала високу продуктивність [30]. Автори в [31] розробили імітаційну модель для вітрових турбін з механізмом гідравлічної трансмісії високого тиску. Вони використали HAWC2 (сучасний аеропружний код, призначений для розрахунку відгуку вітрової турбіни в часовій області), щоб виконати динамічне моделювання вітрової турбіни потужністю 5 МВт. Вони виявили, що гідравлічна вітрова турбіна має хорошу продуктивність за мінливих вітрових умов. Автори в [32] перевірили математичну модель гідровітрогенератора за допомогою MATLAB і AMESim. Вони представили стратегію керування для підтримки постійної швидкості двигуна. Моделювання та експерименти показали, що метод керування мав ефективні характеристики регулювання швидкості.

Через випадковий і переривчастий характер природного вітру вихідна потужність вітрових електростанцій часто коливається, що може вплинути на стабільну роботу енергосистеми та призвести до зниження якості електроенергії. Отже, існує такий же високий попит на системи зберігання енергії (ESS). ESS може зберігати надлишкову енергію, отриману вітровою турбіною, і задовольняти потреби в енергії, коли немає вітру. Енергія вітру може бути перетворена в механічну енергію, електричну енергію, хімічну енергію та енергію тиску, які доцільно зберігати в різних типах систем накопичення енергії [33]. Чуди та ін. запропонував використовувати махову установку як повноцінну систему зберігання енергії для накопичення енергії вітру. Моделі алгебраїчної оптимізації були змодельовані та проаналізовані з використанням фактичних даних про швидкість вітру з вітрової електростанції. Здійсненність плану підтверджено результатами моделювання [34]. Автори змоделювали гідростатичну вітрову турбіну з системою

зберігання енергії на стисненому повітрі (CAES). Конструктивні параметри, такі як коефіцієнт стиснення/розширення та розмір резервуара, були оптимізовані для забезпечення максимального виходу енергії [35]. Для ефективного використання енергії вітру була запропонована вітроенергетична система з системою накопичення теплової енергії (TEC). Дослідження розробило загальну бібліотеку моделей і модель одновимірної системи гібридної системи. Результати показали, що інтегрована система з TEC більшого масштабу була ефективною у використанні відкинутої енергії вітру [36]. Для усунення негативного впливу змінної потужності вітру на енергосистему використовувалися системи накопичення енергії акумуляторів (BESSs). Для повного використання енергії вітру наведено методи визначення потужності БЕС за очікуваним вітром [37].

Лю та ін. запропонували нову гідравлічну вітрову турбіну, як показано на рисунку 3.1a. У цій гідравлічній вітротурбіні гідроакумулятори включені в замкнуту систему гідравлічної вітрової турбіни для накопичення енергії вітру. Ця гідравлічна вітрова турбіна складається з вітрового колеса, насоса з фіксованим об’ємом, гідравлічної системи накопичення енергії (HESGS) і системи наддуву. Вітрове колесо вітрової турбіни використовується безпосередньо для поглинання енергії вітру. Гідравлічний насос використовується для перетворення енергії вітру в гідравлічну енергію, яка безпосередньо підключена до вітрового колеса. Масло з насоса потрапляє в HESGS через зворотний клапан. HESGS може постачати постійну електричну енергію, поглинаючи або вивільняючи нафту під час коливань вітру. Коли вітер виходить за межі робочого діапазону вітрової турбіни, HESGS може продовжувати видавати електричну енергію, вивільняючи гідравлічну енергію, що зберігається в гідроакумуляторах, що значно підвищує якість і стабільність електроенергії від вітрової електростанції [38] .

З точки зору існуючої літератури, були проведені дослідження, присвячені застосуванню систем накопичення енергії для гідравлічних

вітряних турбін [39]. Однак дослідження HESGS, особливо постійного контролю швидкості HESGS, є рідкісними. Крім того, HESGS є гідроакумуляторно-змінною системою двигуна, яка не є типовою гідравлічною схемою, яка часто використовується, і їй бракує вивчення [40]. Отже, терміново потрібне більш інтенсивне дослідження HESGS.

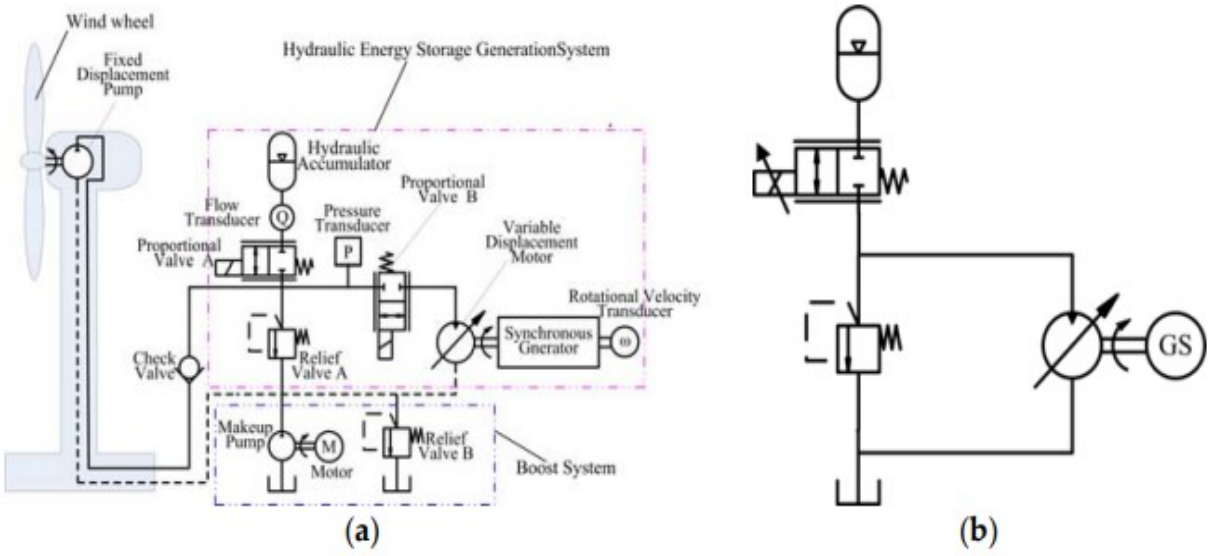


Рисунок 3.1. Принцип нової гідравлічної вітрової турбіни та гідравлічної системи зберігання енергії (HESGS). (а) Гідравлічна вітрова турбіна з гідравлічною системою накопичення енергії; (б) Гідравлічні накопичувачі енергії

3.2. Система контролю постійної швидкості та експериментальна випробувальна установка

3.2.1. Огляд системи

Принципова діаграма HESGS показана на малюнку 1б. HESGS складається з гідроакумулятора, пропорційного регулюючого клапана, запобіжного клапана, двигуна змінного об’єму та синхронного генератора. Генератор з'єднаний з варіатором через муфту валу. Роль пропорційного клапана в цій системі - перемикач потоку масла в акумуляторі. Запобіжний

клапан контролює максимальний робочий тиск і захищає систему від надмірного тиску. Регульований двигун є ключовим компонентом HESGS, який перетворює гідравлічну енергію в механічну енергію, яку поглинає синхронний генератор. Швидкість двигуна підтримується на рівні синхронної швидкості синхронного генератора, спираючись на систему керування постійною швидкістю HESGS, яка забезпечує регулювання робочого об'єму двигуна в реальному часі. На продуктивність системи регулювання постійної швидкості можуть легко вплинути внутрішні та зовнішні перешкоди. Зміна потужності навантаження, яка розглядається як значне зовнішнє порушення системи керування швидкістю двигуна, призведе до серйозних коливань швидкості двигуна та нестабільної частоти генерації. Тому дуже важливо, чи стійкий контроль постійної швидкості HESGS до змінної потужності навантаження

3.2.2. Схема управління

Схема регулювання постійної швидкості HESGS, розглянута в цьому дослідженні, показана на рисунку 3.2. Система керування спрямована на постійну швидкість обертання двигуна, незалежно від того, змінюється тиск в акумуляторі чи потужність навантаження. З рисунка 3.2 видно, що подвійна сервосистема керування ходом циліндра, керованого клапаном. Система замкнутого циклу керування ходом складається з сервоклапана, поршня керування ходом і датчика переміщення. Процес руху поршня керування ходом регулюється вихідною швидкістю потоку та тиском сервоклапана, який пропорційний вхідному сигналу на сервоклапан. Положення поршня керування ходом виявляється та перетворюється в електричні сигнали датчиком переміщення, який порівнюється з опорним сигналом кута замкнутого циклу керування ходом. Результат порівняння називається відхиленням положення, яке дорівнює нулю, коли поршень керування ходом досягає потрібного положення. Якщо відхилення не дорівнює нулю, рух поршня керування ходом керується сервоклапаном у бік меншого відхилення.

Таким чином, кут перекосної пластини та опорний сигнал кута завжди збігаються. ПІД-регулятор використовується для покращення швидкої реакції на регулювання переміщення та забезпечення точності позиціонування

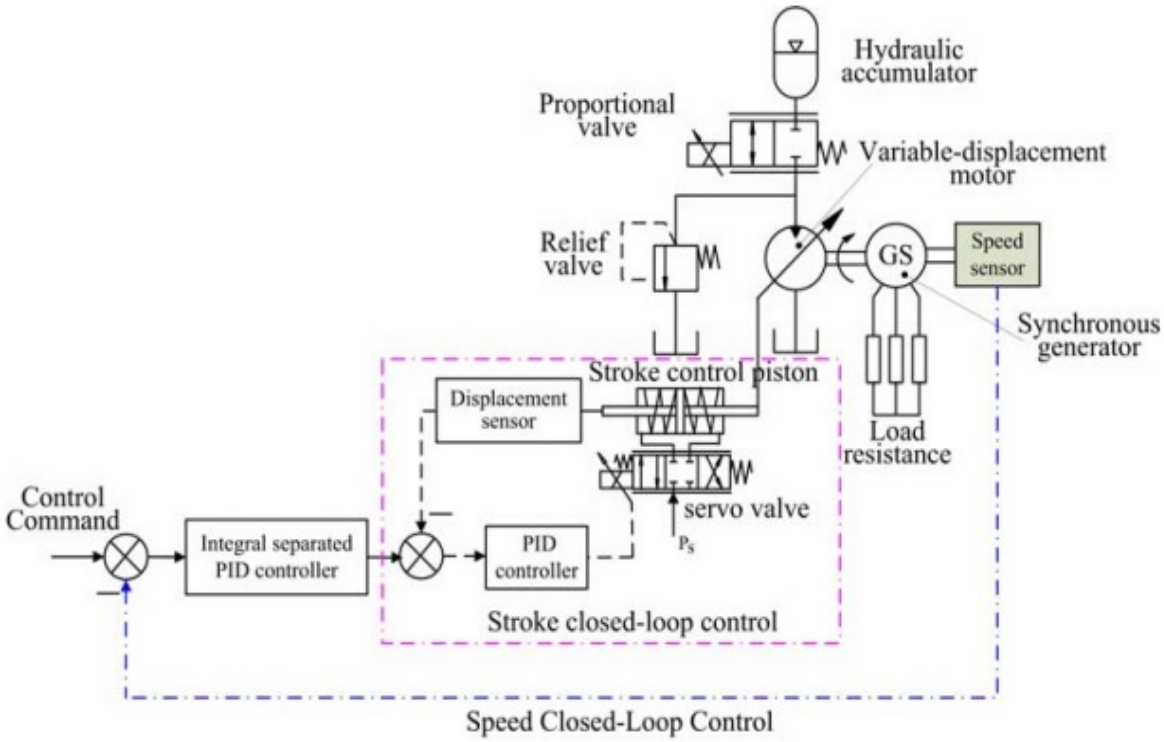


Рисунок 3.2. Система керування постійною швидкістю гідравлічної системи накопичення енергії.

Інший – це замкнуте керування швидкістю двигуна. Датчик швидкості відіграє важливу роль у регулюванні швидкості двигуна, і його точність має значний вплив на стабільну точність системи керування швидкістю. Відхилення швидкості, яке обчислюється шляхом віднімання фактичної швидкості, виміряної датчиком швидкості, із опорного сигналу швидкості, перетворюється на опорний сигнал кута за допомогою інтегрального розділеного алгоритму ПІД-контролю. Швидкість двигуна буде знижуватися за умови зниження тиску в акумуляторі або збільшення потужності навантаження. Відхилення швидкості стане позитивним, а опорний сигнал кута збільшиться, що призведе до збільшення робочого об’єму двигуна. Двигун прискориться, оскільки гідравлічний крутний момент, створюваний

двигуном, більший, ніж крутний момент навантаження, спричинений генератором. Відхилення швидкості дорівнює нулю, коли швидкість двигуна підвищується до опорного сигналу швидкості, тим часом опорний сигнал кута та робочий об’єм двигуна не змінюються. Таким чином швидкість двигуна підтримується на бажаному рівні. Швидкість двигуна збільшиться за умови підвищення тиску в гідроакумуляторе або зниження потужності навантаження. Тенденція зміни контрольних змінних прямо протилежна. Вбудований відокремлений ПІД-регулятор використовується, щоб уникнути серйозного перевищення швидкості під час запуску двигуна

3.2.3. Експериментальний випробувальний стенд

Експериментальний випробувальний стенд HESGS налаштований, як показано на рисунку 3.3. Двигун Rexroth A4V використовується для перетворення гідравлічної потужності, що зберігається в гідроакумуляторі, у механічну. Датчик швидкості обертання вбудований в регульований двигун. Безщітковий синхронний генератор збудження з'єднаний з регульованим двигуном через гнучку муфту, яка перетворює механічну енергію від двигуна в електричну. Електрична енергія, вироблена синхронним генератором, подається в навантаження. Він перетворюється на тепло в навантажувальній установці та розсіюється в повітрі. Тридцять балонних акумуляторів об’ємом 200 л (компанія Chaori, Фенхуа, Китай) обрані в якості накопичувача гідравлічної енергії, оскільки вони мають хороші економічні та динамічні характеристики. Перед початком експерименту масло в баку закачується в гідроакумулятор за допомогою системи наддуву.

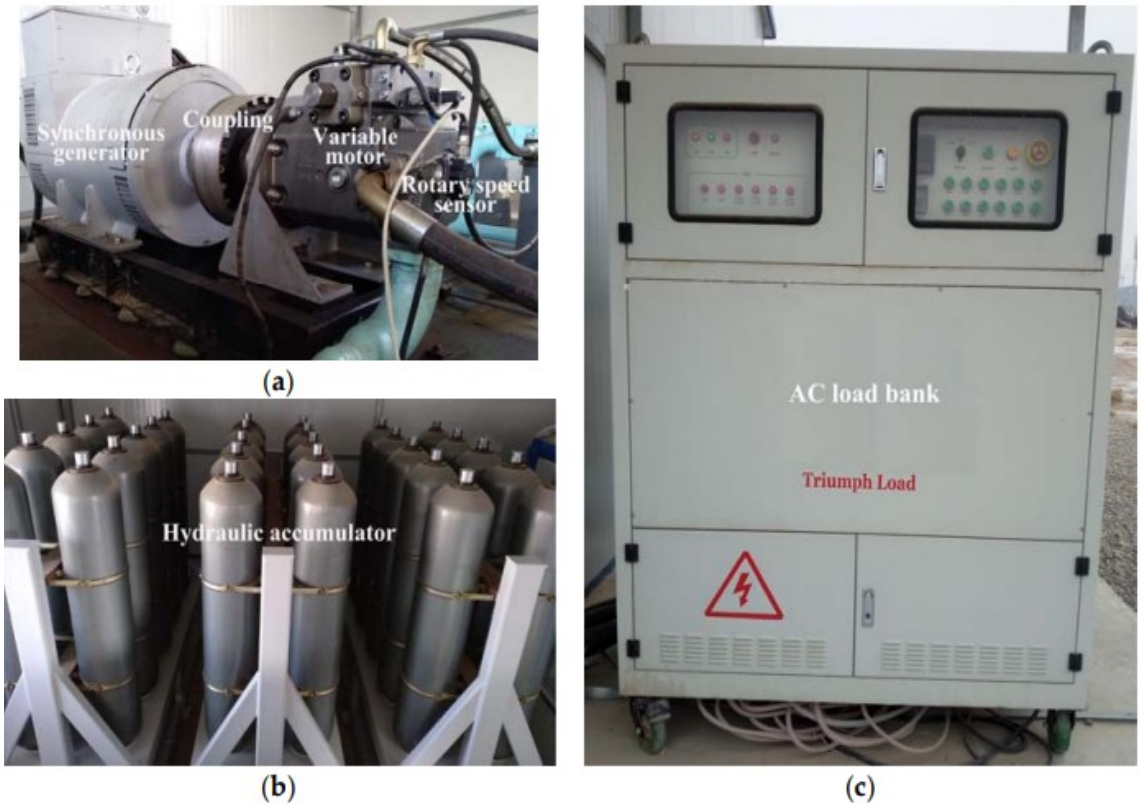


Рисунок 3.3. Фотографія випробувальної установки HESGS. а -регульований двигун і генератор; б - гідроакумулятор; с - банк навантаження.

3.3. Математична модель гідроакумулятора

Перед побудовою математичної моделі всієї системи враховуються такі припущення:

1) Втратами тиску в трубопроводі та динамічними характеристиками трубопроводу нехтують для малої довжини трубопроводу.

2) Внутрішні та зовнішні витоки регульованого двигуна є ламінарним потоком, який пропорційний різниці тиску. Тиск у корпусі змінного двигуна дорівнює нулю.

3) Об’ємний модуль і густина гідравлічного масла є постійними.

4) Динаміка запобіжного клапана вважається незначною.

3.3.1. Гідроакумулятор

Баллонний акумулятор використовується в HESGS для зберігання масла з насоса, який складається зі сталевої оболонки, гумової камери та антиекструзійної системи. Гумовий міхур наповнений газоподібним азотом. Робочий процес газоподібного азоту підкоряється закону ідеального газу

$$P_a V_a{}^n = P_0 V_0{}^n \tag{1}$$

$$P_a = \frac{P_0 V_0{}^n}{V_a{}^n} = \frac{P_0 V_0{}^n}{(V_0 + \int Q_a \mathrm{d}t)^n} \tag{2}$$

$$Q_a = -\frac{V_0 P_0{}^{\frac{1}{n}}}{n P_a{}^{\frac{n+1}{n}}} \frac{dP_a}{dt} \tag{3}$$

де P_0 і V_0 – тиск передзаправки газу та об’єм акумулятора. Pa і Va представляють тиск і об'єм газу в процесі стиснення. Q_a – витрата заряду або розряду акумулятора. n – показник політропності, який дорівнює 1 для ізотермічного процесу і 1,4 для адіабатичного.

3.3.2. Пропорційний клапан

Пропорційний клапан широко використовується в гідравлічній системі для ідеальної контрольної характеристики. Вихідний потік пропорційного клапана пропорційний вхідному струмовому сигналу. Відповідні рівняння виглядають наступним чином:

$$Q_{pv} = C_d A \sqrt{\frac{2(P_{pvin} - P_{pvout})}{\rho}} \tag{4}$$

$$A = \begin{cases} A_{\max} I_{pv} & 0 \le I_{pv} \le 1 \\ A_{\max} & I_{pv} > 1 \end{cases} \tag{5}$$

де Q_{pv} – витрата через пропорційний клапан. P_{pvin} і P_{pvout} представляють тиск на вході та виході пропорційного клапана. C_d – коефіцієнт потоку. A_{max} —

максимальна площа відкриття. A — фактична площа відкриття, пропорційна вхідному струму I_{pv}. Пропорційний клапан налаштований на контроль потоку заряду та розряду акумулятора. Акумулятор закритий, коли вхідний струм I_{pv} дорівнює нулю

3.3.3. Запобіжний клапан

Запобіжний клапан відіграє важливу роль у надійності гідравлічної системи. Його функції в основному можна розділити на два типи: (1) регулювання та обмеження максимального тиску в системі; (2) підтримання постійного тиску в системі:

$$Q_{rv} = \begin{cases} (P_{rvin} - P_{rvout} - P_{op})\, K_{rv} & P_{rvin} - P_{rvout} \geq P_{op} \\ 0 & P_{rvin} - P_{rvout} < P_{op} \end{cases} \tag{6}$$

де P_{rvin} і P_{rvoout} – тиск на вході та тиск на виході запобіжного клапана відповідно. Q_{rv} представляє потік переливу через запобіжний клапан, який обчислюється за рівнянням (6). P_{op} — це тиск крекінгу, а K_{rv} — коефіцієнт тиску та витрати. Коли різниця між P_{rvin} і P_{rvoout} більша, ніж P_{op}, серцевина клапана в запобіжному клапані відходить від сідла клапана, масло переливається в резервуар через отвір, утворений серцевиною клапана та сідлом клапана.

3.3.4. Змінний двигун

Система керування ходом варіаторного двигуна є типовою електрогідравлічною сервосистемою циліндра з клапанним керуванням, тому для опису динамічних характеристик регульованого механізму можна використовувати модель першого порядку [41, 42]:

$$\frac{D_m(s)}{U_m(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1} \tag{7}$$

де D_m - об'єм змінного двигуна. U_m - сигнал керування сервоконтролеру. K_m — коефіцієнт посилення керування ходом двигуна, а T_m — постійна часу

керування ходом. Відповідно до рівняння нерозривності рівняння потоку для трубопроводу можна записати так:

$$Q_a - Q_{rv} - Q_m = \frac{V}{\beta}\frac{dP_1}{dt} \tag{8}$$

де Q_m – потік двигуна. V - загальний об'єм під стисненням, включаючи масло в трубопроводі високого тиску, акумуляторі та змінному двигуні. β – ефективний об’ємний модуль гідравлічного масла. P_1 і P_2 представляють тиск на вході та тиск на виході двигуна:

$$Q_m = D_m\omega_m + C_{im}(P_1 - P_2) + C_{em}P_1 \tag{9}$$

де ω_m – швидкість обертання двигуна. C_{im} і C_{em} представляють внутрішній і зовнішній коефіцієнти витоку двигуна відповідно. Динамічне рівняння інерції вантажу для руху встановлюється наступним чином за допомогою другого закону Ньютона:

$$D_m(P_1 - P_2) = J_t\frac{d\omega_m}{dt} + B_v\omega_m + T_f + T_d \tag{10}$$

де J_t – сумарна інерція ротора регульованого двигуна та генератора. B_v - коефіцієнт в'язкого тертя ротора. T_f

– кулонівський момент тертя, а T_d – зовнішній крутний момент для виробництва електроенергії. T_d – це збурення для всієї системи, оскільки воно змінюється залежно від потужності навантаження.

3.3.5. Синхронний генератор

Модель синхронного генератора отримано на основі перетворення Парка [43]. Рівняння балансу напруг ротора і статора в координатах dq0 виводяться згідно з узагальненим законом Ома:

$$U_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_e \psi_{sq} - R_a i_{sd} \tag{11}$$

$$U_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_e \psi_{sd} - R_a i_{sq} \tag{12}$$

$$0 = \frac{d\psi_{dd}}{dt} + R_{dd} i_{dd} \tag{13}$$

$$0 = \frac{d\psi_{dq}}{dt} + R_{dq} i_{dq} \tag{14}$$

де U_{sd} і U_{sq} — напруга статора на осі d і q Парка. ψ_{sd} і ψ_{sq} – потокозчеплення обмоток статора. i_{sd} та i_{sq} – струм статора на осі d Парка та осі q Парка, а R_a – опір обмотки статора. ψ_{dd} і ψ_{dq} – потокозчеплення обмоток демпфера. i_{dd} і i_{dq} – струм статора через обмотки демпфера. R_{dd} і R_{dq} – опір обмотки демпфера.

Нижче наведено вираз рівняння потокозчеплення обмотки. Електромагнітний крутний момент Г визначається рівнянням (20):

$$\psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} i_{fl} + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sd} i_{dd} \tag{15}$$

$$\psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sq} i_{dq} \tag{16}$$

$$\psi_{fl} = L_f i_{fl} + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} i_{sd} + M_{fd} i_{dd} \tag{17}$$

$$\psi_{dd} = L_{dd} i_{dd} + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sd} i_{sd} + M_{fd} i_{fl} \tag{18}$$

$$\psi_{dq} = L_{dq} i_{dq} + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sq} i_{sq} \tag{19}$$

$$\Gamma = p(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) \tag{20}$$

де M_{sf}, M_{sd}, M_{sq} і M_{fd} — взаємна індуктивність між двома обмотками. L_{sd}, L_{sq}, L_f, L_{dd} і L_{dq} — індуктивність обмоток. p – кількість пар полюсів.

3.3.6. Датчик швидкості

У регулюванні швидкості важливу роль відіграє датчик швидкості обертання, який перетворює швидкість двигуна в електричний сигнал:

$$U_{ss} = \omega_m K_{ss} \tag{21}$$

де U_{ss} – відповідне значення напруги. K_{ss} – коефіцієнт посилення датчика частоти обертання.

3.3.7. Банк навантаження

Банк навантаження - це, по суті, змінний електричний опір. Співвідношення між напругою U_l, опором R_l і струмом I_l наступне:

$$I_l = \frac{U_l}{R_l} \tag{22}$$

3.4. Моделювання та експериментальне дослідження

3.4.1. Моделювання міцності на кроку потужності постійного навантаження

Імітаційна модель HESGS побудована в середовищі MATLAB/SIMULINK (версія 6.5, MathWorks Company, Natick, MA, USA). Дослідження моделювання проводяться для підтвердження ефективності регулювання постійної швидкості та оцінки впливу пропорційного підсилення та інтегрального підсилення інтегрального розділеного ПІД-регулятора на надійність запропонованої схеми керування.

При моделюванні ступінчаста зміна потужності навантаження (від 0 кВт до 35 кВт) використовується як зовнішнє збурення крутного моменту для HESGS, як показано на рисунку 3.4. Мутація потужності навантаження відбувається через 15 с. Далі показані відповіді на крок потужності навантаження, що дасть ефективність усунення збурень крутного моменту для постійного керування швидкістю двигуна, коли потужність навантаження раптово зростає.

На рисунку 5 показано, що чим менше пропорційне посилення, тим повільніше змінюється об’єм двигуна. З рисунків 3.5 і 3.6 показано, що максимальне відхилення швидкості двигуна буде зменшуватися зі збільшенням пропорційного посилення. Відхилення швидкості становить 2,25 об/хв, коли пропорційне посилення становить 0,05. Він найповільніше змінює об'єм двигуна. Тим часом швидкість двигуна перевищує команду швидкості 1500 об/хв через повільне регулювання об’єму двигуна. Коли пропорційне посилення дорівнює 0,5, мінімальне відхилення швидкості становить майже 0,75 об/хв. Однак коливання виникають при переміщенні двигуна. Швидкість двигуна коливається в результаті коливань робочого об’єму двигуна.

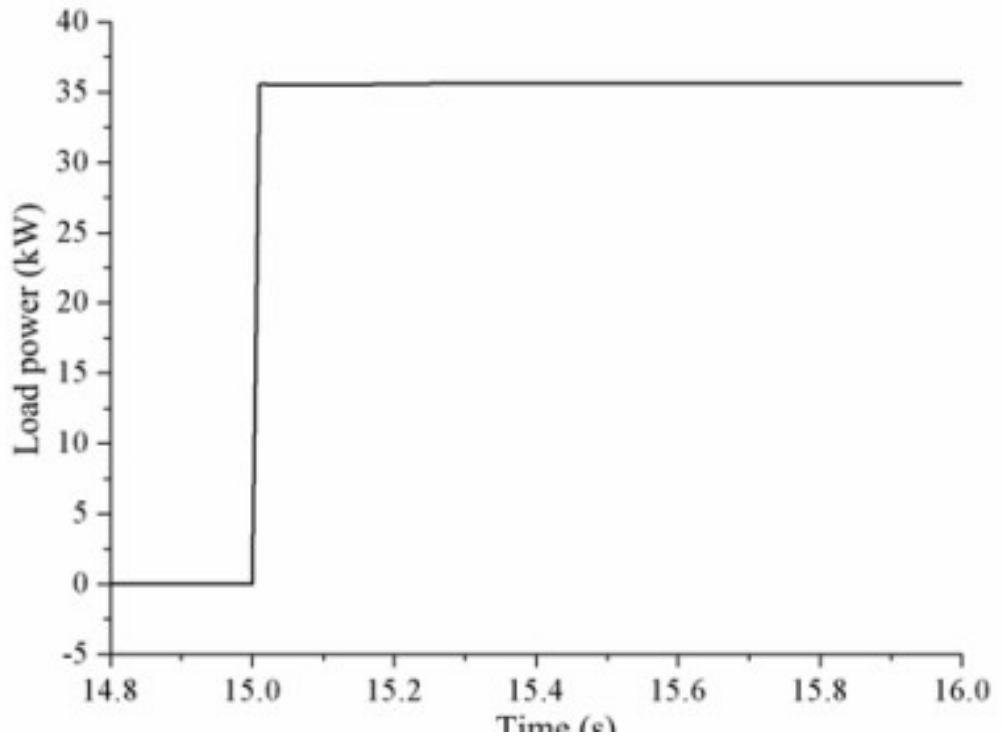


Рисунок 3.4. Крок потужності навантаження HESGS.

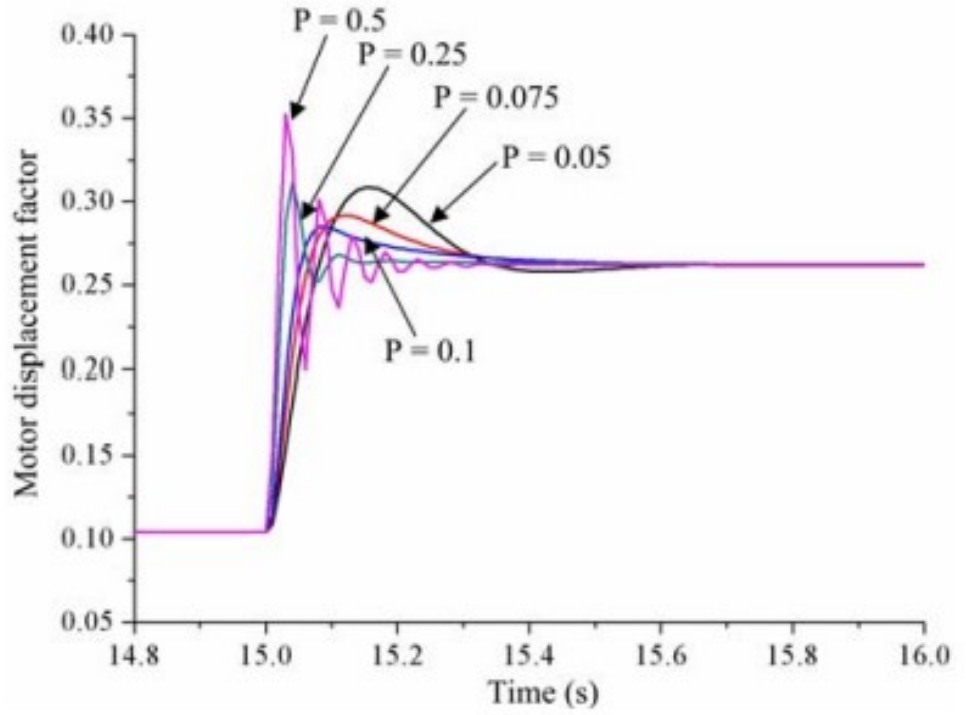


Рисунок 3.5. Змодельована реакція на зміщення двигуна HESGS з різними пропорційними посиленнями.

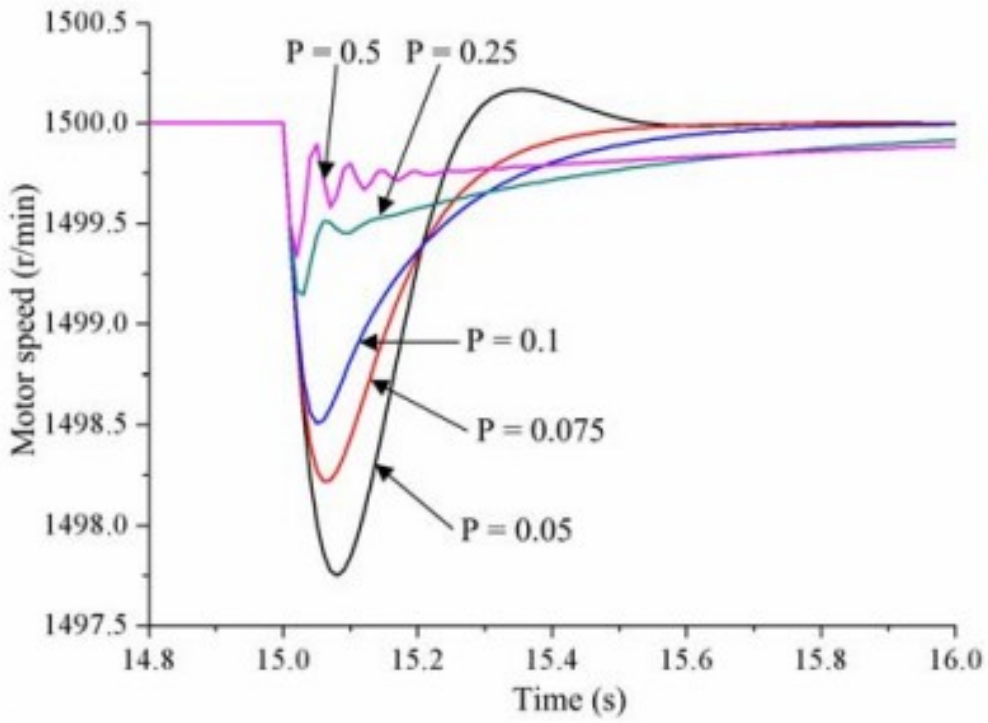


Рисунок 3.6. Змодельована швидкість реакції двигуна HESGS з різними пропорційними посиленнями.

Реакція тиску в гідроакумуляторі показана на рисунку 3.7, який ілюструє, що тиск в гідроакумуляторі швидко знижується внаслідок збільшення потужності навантаження. Показано, що форми робочого об'єму двигуна і тиску в акумуляторі однакові, але змінюються в протилежному напрямку.

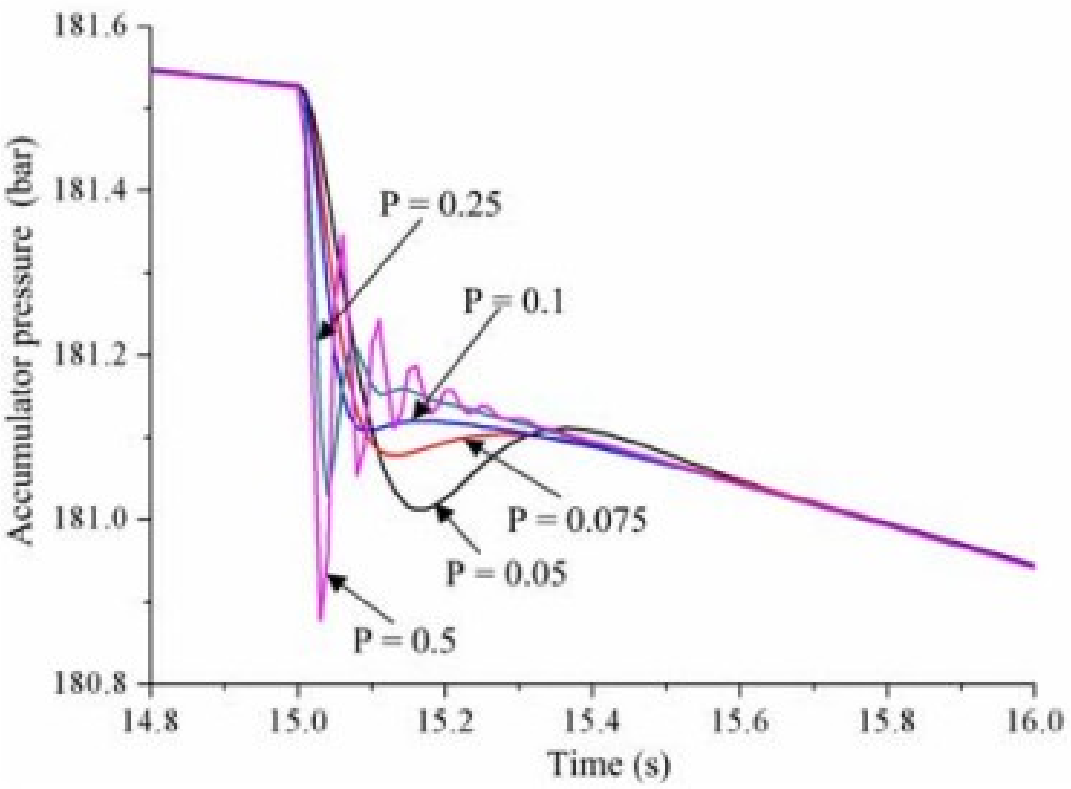


Рисунок 3.7. Змодельована реакція тиску в акумуляторі HESGS з різними пропорційними посиленнями.

Реакції робочого об'єму двигуна з різними інтегральними коефіцієнтами посилення показані на малюнку 8. Можна побачити, що робочий об'єм двигуна змінюється одночасно незалежно від інтегрального коефіцієнта посилення, що призводить до того, що максимальні відхилення швидкості майже однакові, як показано на рисунку 3.9.

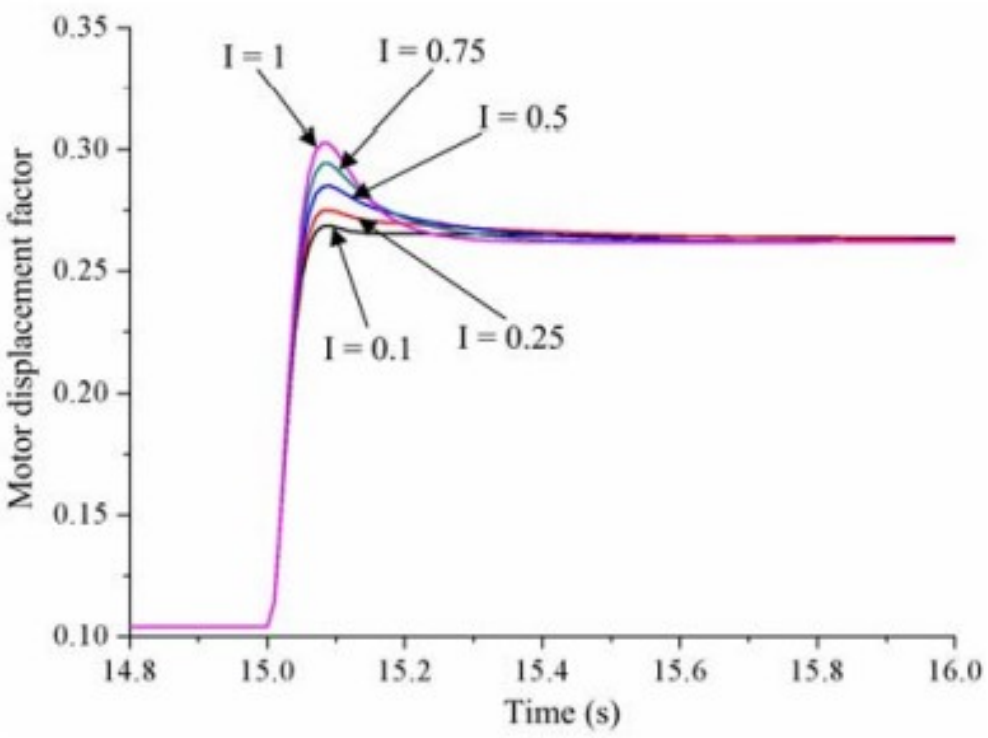


Рисунок 3.8. Змодельована реакція HESGS на зміщення двигуна з різними інтегральними коефіцієнтами посилення.

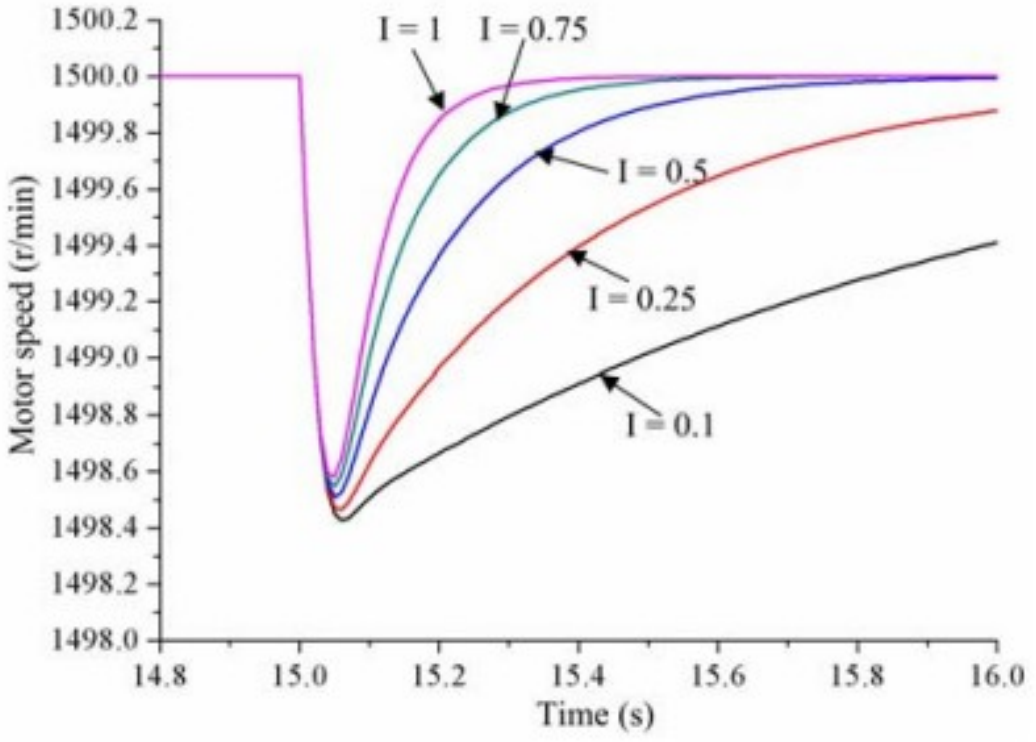


Рисунок 3.9. Змодельована характеристика швидкості двигуна HESGS з різними інтегральними підсиленнями.

Перевищення об’єму двигуна збільшується, коли інтегральний коефіцієнт посилення стає більшим. Загальний час відновлення швидкості двигуна найкоротший через найбільше перевищення об’єму двигуна. На малюнку 10 показано, що тенденція зміни тиску в акумуляторі майже ідентична тенденції зміни робочого об’єму двигуна; напрямок зміни тиску в акумуляторі є зворотним до напрямку руху робочого об’єму двигуна.

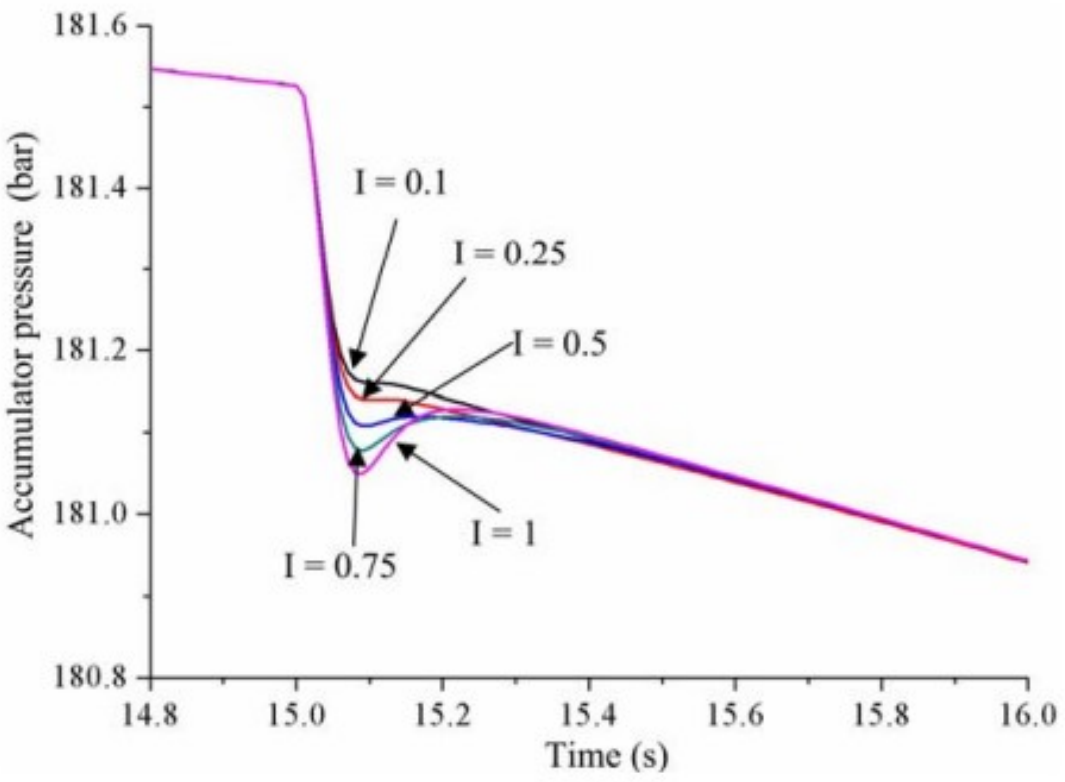


Рисунок 3.10. Симульована характеристика тиску в акумуляторі HESGS з різними інтегральними підсиленнями.

3.4.2. Експерименти міцності на змінному кроці потужності навантаження

Під час роботи гідровітрогенератора з гідроакумулятором енергія вітру, уловлена вітроагрегатом при турбулентному надходженні, повністю накопичується в гідроакумуляторі ГЕСГС. HESGS виробляє електричну енергію шляхом перетворення гідравлічної енергії, що зберігається в

гідроакумуляторі. Процес накопичення енергії вітру та процес виробництва електроенергії HESGS є незалежними процесами. Відповідно, на процес виробництва електроенергії HESGS не впливає стохастичний характер вітрової турбулентності, і на нього в основному впливає змінність потужності навантаження через часту зміну споживання електроенергії. Експерименти проводяться не тільки для перевірки результатів моделювання, розглянутих у розділі 3.4.1, але й для вивчення стійкості постійного керування швидкістю двигуна при змінних збуреннях потужності навантаження.

Команда швидкості двигуна в цих експериментах встановлена на 1300 об/хв для забезпечення безпеки експерименту. Пропорційне посилення та інтегральне посилення мають однакове значення 0,1. Потужність навантаження легко змінюється шляхом зміни керуючого сигналу банку навантаження. Варіації кроку потужності навантаження 8 кВт, 10 кВт і 15 кВт. Потужність навантаження зростає в першій половині експерименту і зменшується в другій. Результати моделювання та експерименту щодо вихідної активної потужності синхронного генератора показані на рисунку 3.11.

На рисунку 3.12 показано результати моделювання та експерименту щодо швидкості двигуна за наявності перешкод у потужності навантаження. Легко зробити висновок, що відхилення швидкості стає більшим із збільшенням збурення потужності навантаження. Експериментальні результати також показують, що фактична стабільна швидкість двигуна близька до бажаної швидкості та має невелику зміну близько 1300 об/хв, що відповідає вимогам частоти генерування. На рисунку 3.13 показано, що зміна об’єму двигуна зростає пропорційно зміні потужності навантаження. Крива тиску гідроакумулятора при змінному ступені потужності навантаження показана на рисунку 3.14. Відповідна зміна тиску гідроакумулятора виробляється через збурення потужності навантаження. Як видно з рисунків 11–14, результати моделювання майже ідентичні результатам експерименту.

Деяка пульсація результатів експерименту може бути результатом мертвої зони вбудованого розділеного ПІД-регулятора.

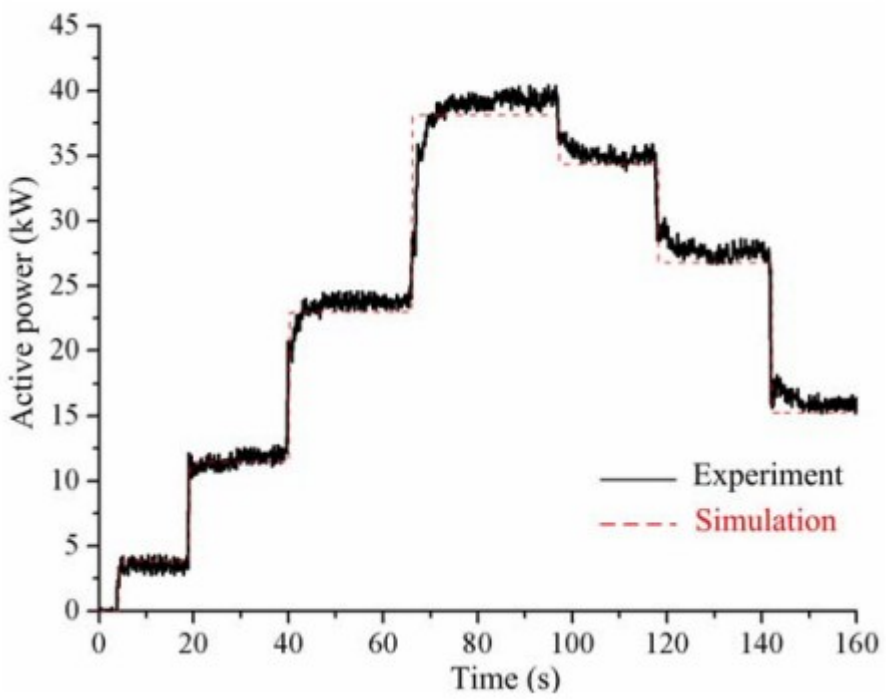


Рисунок 3.11. Відповіді на активну потужність HESGS під змінним кроком потужності навантаження.

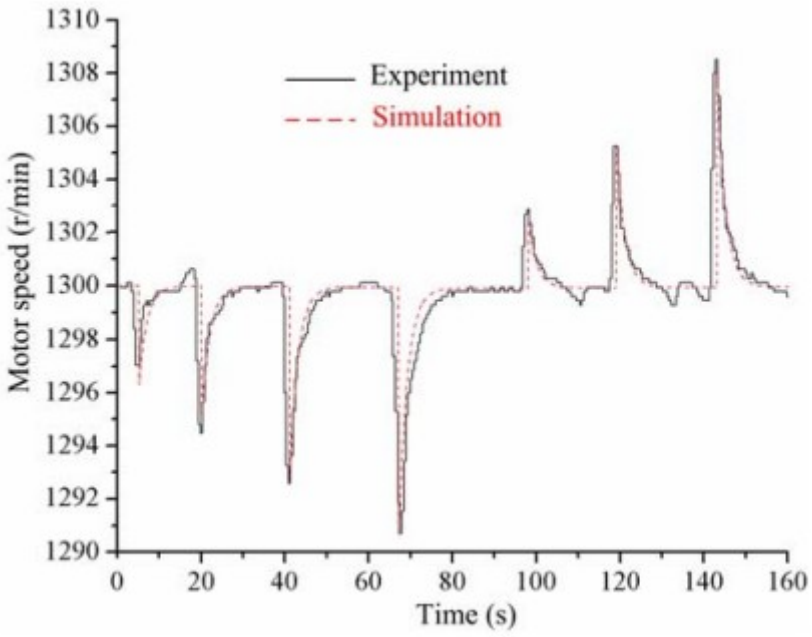


Рисунок 3.12. Реакція швидкості двигуна HESGS під змінним кроком потужності навантаження.

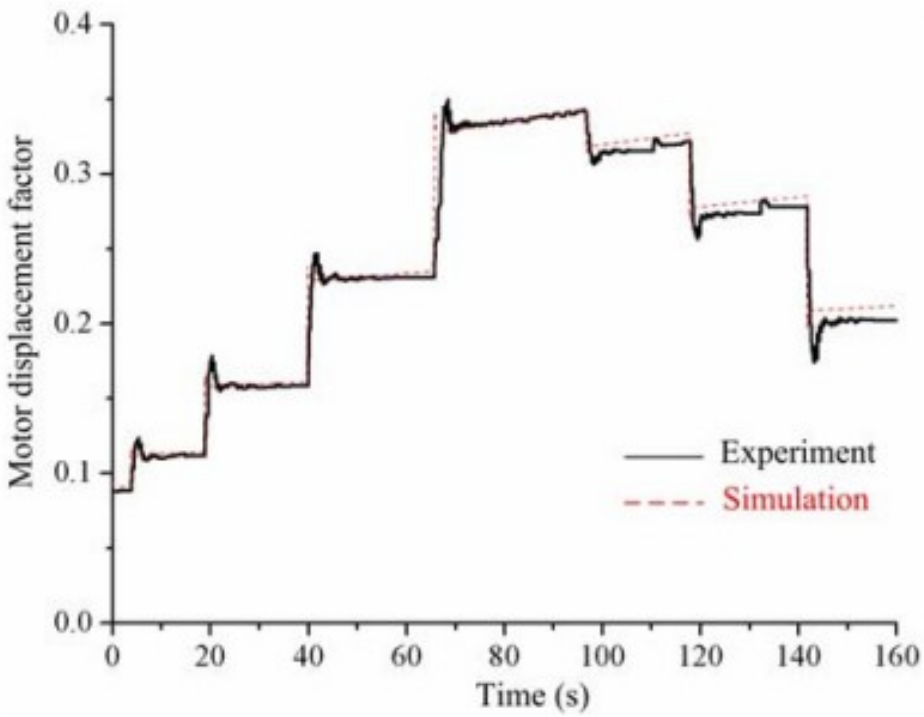


Рисунок 3.13. Реакція двигуна на зсув HESGS під змінним кроком потужності навантаження.

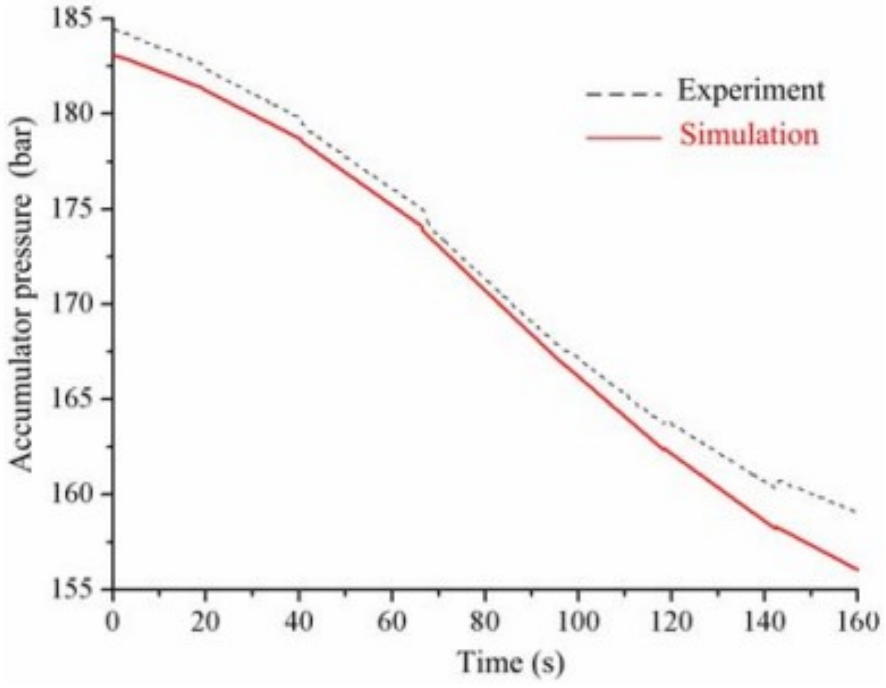


Рисунок 3.14. Реакція тиску в акумуляторі HESGS при змінному ступені потужності навантаження.

Висновки за третім розділом

Щоб усунути коливання та переривчастість енергії сонця, гідроакумулятор використовується для накопичення енергії сонця, що вловлюється фотоелектричними модулями. При слабкому вітрі або без вітру електроенергія виробляється синхронним генератором через HESGS. HESGS працює на сильному зовнішньому збуренні крутного моменту для різних потужностей навантаження, тому важливо вивчити стійкість системи керування постійною швидкістю до збурень потужності навантаження.

. Для забезпечення постійної швидкості двигуна незалежно від зміни потужності навантаження використовується подвійна схема керування замкнутим контуром. Моделюється вплив пропорційного підсилення та інтегрального підсилення на надійність системи керування постійною швидкістю при постійному кроку потужності навантаження. Для перевірки імітаційної моделі та обговорення надійності за умови змінної потужності навантаження, порівняльні дослідження моделювання та експерименту реалізуються за однакових умов. За умови постійного кроку потужності навантаження 35 кВт відхилення швидкості зменшується з 2,25 до 0,75 об/хв, оскільки діапазон пропорційного посилення становить від 0,05 до 0,5. Подібним чином, час відновлення швидкості двигуна буде зменшуватися зі збільшенням інтегрального підсилення. При інтегральному посиленні, що дорівнює одиниці, час відновлення досягає мінімуму 0,4 с. Результати показують, що запропонований підхід керування має хорошу продуктивність і високу надійність, що дозволяє швидко повертатися до початкової швидкості та реалізує нульову похибку в стаціонарному стані для кроку потужності навантаження. Слід підкреслити, що крок потужності навантаження не може бути занадто високим. Існує велике коливання швидкості двигуна через велику різноманітність потужності навантаження, що може призвести до нестабільності частоти генератора.

ВИСНОВКИ

В роботі було проведено ґрунтовний критичний аналіз сучасних технологій накопичення енергії гравітаційними акумуляторами.

Розроблено загальні принципи побудови комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії.

Розроблено технологічну схему комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії.

Досліджено параметри керування постійною швидкістю гідравлічного накопичувача енергії.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Peter Alstone, Dimitry Gershenson, Daniel M. Kammen. Decentralized energy systems for clean electricity access. Nature climate change, vol. 5, https://rael.berkeley.edu/wp-content/uploads/2016/04/Alstone-Gershenson-KammenNatureClimateChange-EnergyAccess.pdf. (2015).

2. United States Environmental Protection Agency. Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts. Washington, DC 20460, https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmentalimpacts#ref1. (2019).

3. Urishev B (2019) Decentralized Energy Systems, Based on Renewable Energy Sources. Applied Solar Energy, vol. 55, no. 3, pp. 207–212. DOI: 10.3103/S0003701X19030101

4. Shafiqur Rehman, Luai M. Al-Hadhrami, Md. Mahbub Alam. (2015) Pumped hydro energy storage system: A technological review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, no. 44, pp. 586–598.

5. Kaldellis JK, Kavadias KA. Optimal wind-hydro solution for Aegean Sea islands' electricity-demand fulfilment. Appl Energy, no.70(4), pp.333–354. (2001).

6. Weisser D, Garcia RS. 2005 Instantaneous wind energy penetration in isolated electricity grids: concepts and review. Renewable Energy, no. 30(8), pp. 1299–1308.

7. Jacob T. Pumped storage in Switzerland—an outlook beyond, Stucky Consulting Engineers, The Economist. (2014).

8. Bakos G.C. Feasibility study of a hybrid wind/hydro power-system for low- cost electricity production. Appl Energy, no.72 (3–4), pp. 599–608. (2002).

9. Ardizzon G, Cavazzini G, Pavesi G. A new generation of small hydro and pumpedhydro power plants: advances and future challenges. Renewable Sustainable Energy Rev. no. 31, pp. 746–61. (2014).

10. Hoicka CE, Roewlands IH. Solar and wind resource complementarity: advancing options for renewable electricity integration in Ontario, Canada. Renewable energy, no. 36, pp. 97–107. (2011).

11. Caralis G, Rados K, Zervos A. On the market of wind with hydro-pumped storage systems in autonomous Greek islands. Renewable Sustainable Energy Rev. no.14, pp. 2221–2226. (2010).

12. Dursun B, Bora A. The contribution of wind-hydro pumped storage systems in meeting Turkey's electric energy demand. Renewable Sustainable Energy Rev. no. 14 (7), pp. 1979–1988. (2010).

13. Tuohy A, O'Malley M. 2011 Pumped storage in systems with very high wind penetration. Energy Policy, no. 39(4), pp. 1965–1974

14. Connolly D, Lund H, Mathiesen BV, Pican E, Leahy M. The technical and economic implications of integrating fluctuating renewable energy using energy storage. Renewable energy, no. 43, pp. 47–60. (2012).

15. Varkani AK, Daraeepour A, Monsef H. A new self-scheduling strategy for integrated operation of wind and pumped-storage power plants in power markets. Appl Energy, no. 88, pp. 5002–5012. (2011).

16. Anagnostopoulos JS, Papantonis DE. Study of pumped storage schemes to support high RES penetration in the electric power system of Greece. Energy, no. 45(1), pp. 416–423. (2012).

17. Katsaprakakis DA, Christakis DG, Pavlopoylos K, et al. Introduction of a wind pumped storage system in the isolated insular power system of Karpathos – Kasos. Appl Energy no. 97, pp. 38–48. (2012).

18. Katsaprakakis DA, Christakis DG, Stefanakis I, Spanos P, Stefanakis N. Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems. Energy, no. 55, pp. 619–630. (2013).

19. Murage M W, Anderson C L. Contribution of pumped hydro storage to integration of wind power in Kenya: an optimal control approach. Renewable energy, no. 63, pp. 698–707. (2014).

20. Urishev B (2019) Selection of Parameters of Pumped Storage Power Plants at Large Pumping Stations for Water Use. Applied Solar Energy, vol. 54, no. 6, pp. 477–480. DOI: 10.3103/S000 3701X18 060166

21. David G. Victor. (2019) Pumped Energy Storage: Vital to California's Renewable Energy Future Release. https://www.energy.senate.gov/services/files/F5F5EDF0- E298-4843-BAA5-CC8605586484

22. Jha, D. A Comprehensive review on wind energy systems for electric power generation: Current situationand improved technologies to realize future development. Int. J. Renew. Energy Res. 2017, 7, 1786–1805.

23. Global Wind Energy Council (GWEC). Global Wind Report: Annual Market Update; GWEC: Brussels, Belgium, 2016

24. Silva, P.; Giuffrida, A.; Fergnani, N.; Macchi, E.; Cantù, M.; Suffredini, R.; Schiavetti, M.; Gigliucci, G. Performance prediction of a multi-MW wind turbine adopting an advanced hydrostatic transmission. Energy2014, 64, 450–461.

25. Ragheb, A.; Ragheb, M. Wind turbine gearbox technologies. In Proceedings of the 2010 1st International Nuclear Renewable Energy Conference (INREC), Amman, Jordan, 21–24 March 2010.

26. Saidur, R.; Rahim, N.A.; Islam, M.R.; Solangi, K.H. Environmental impact of wind energy. Renew. Sustain. Energy Rev. 2011, 15, 2423–2430.

27. Pedersen, E.; Larsman, P. The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines. J. Environ. Psychol. 2008, 28, 379–389.

28. Polinder, H.; van de Pijl, F.F.A.; de Vilder, G.J.; Tavner, P.J. Comparison of direct-drive and geared generatorconcepts for wind turbines. IEEE Trans. Energy Convers. 2006, 21, 725–733.

29. Cai, M.; Wang, Y.; Jiao, Z.; Shi, Y. Review of fluid and control technology of hydraulic wind turbines. Front. Mech. Eng. 2017, 12, 312–320.

30. Nikranjbar, A.; Sharbabaki, A.N. Simulation and control of wind turbine using hydrostatic drive train. Majlesi J. Energy Manag. 2013, 2, 12–17.

31. Jiang, Z.; Yang, L.; Gao, Z.; Moan, T. Numerical simulation of a wind turbine with a hydraulic transmission system. Energy Procedia 2014, 53, 44–55. [CrossRef]

32. Zhang, Y.; Kong, X.; Li, H.; Chao, A. Controls of hydraulic wind turbine. In Proceedings of the 2015 International Conference on Mechanical Engineering and Electrical Systems, EDP Sciences, Singapore, 16–18 December 2015.

33. Díaz-González, F.; Sumper, A.; Gomis-Bellmunt, O.; Villafáfila-Robles, R. A review of energy storage technologies for wind power applications. Renew. Sustain. Energy Rev. 2012, 16, 2154–2171.

34. Chudy, M.; Herbst, L.; Lalk, J. Wind farms associated with flywheel energy storage plants. In Proceedings of the Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Istanbul, Turkey, 12–15 October 2014.

35. Ali, A.E.; Libardi, N.C.; Anwar, S.; Izadian, A. Design of a compressed air energy storage system for hydrostatic wind turbines. Energy 2018, 6, 229–244.

36. Liu, C.; Cheng, M.-S.; Zhao, B.-C.; Dai, Z.-M. A Wind power plant with thermal energy storage for improving the utilization of wind energy. Energies 2017, 10, 2126.

37. Yao, D.L.; Choi, S.S.; Tseng, K.J.; Lie, T.T. A statistical approach to the design of a dispatchable wind power-battery energy storage system. IEEE Trans. Energy Convers. 2009, 24, 916–925.

38. Liu, Z.; Yang, G.; Wei, L.; Yue, D. Variable speed and constant frequency control of hydraulic wind turbine with energy storage system. Adv. Mech. Eng. 2017, 9, 1–10.

39. Qin, C.; Innes-Wimsatt, E.; Loth, E. Hydraulic-electric hybrid wind turbines: Tower mass saving and energy storage capacity. Renew. Energy 2016, 99, 69–79.

40. Yu, H.; Liu, Y.; Wang, Y.; Wang, M.; Qin, X. Speed governing controller of gasoline engine based on integral-separation fuzzy PID control. In Proceedings of the 2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), Beijing, China, 8–10 July 2016.

41. Jen, Y.; Lee, C. Robust speed control of a pump-controlled motor system. IEE Proc. D Control Theory Appl. 1992, 139, 503–510.

42. Xu, M.; Ni, J.; Chen, G. Dynamic simulation of variable-speed valve-controlled-motor drive system with a power-assisted device. J. Mech. Eng. 2014, 60, 581–591.

43. Hernandez, R.G.; Ramirez, R.G. Modeling and control of a wind turbine synchronous generator. In Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference(CERMA), Cuernavaca, Morelos, Mexico, 15–18 November 2011

44. Kalogirou SA. Seawater desalination using renewable energy sources. Prog Energy Combust Sci 2005;31:242–81.

45 Fritzmann C, Lowenberg J, Wintgens T, Melin T. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. Desalination 2007;216:1–76.

46 Mathioulakis E, Belesiotis V, Delyannis E. Desalination by using alternative energy: review and state-of-the-art. Desalination 2007;203:346–65.

47. Garcia RL. Renewable energy applications in desalination: state of the art. Sol Energy 2003;75:381–93.

48. Anagnostopoulos JS, Papantonis DE. Pumping station design for a pumped storage wind-hydro power plant. Energy Convers Manage 2007;48:3009–17.

49. Papaefthymiou SV, Papathanassiou SA. Optimum sizing of wind-pumpedstorage hybrid power stations in island systems. Renewable Energy 2014;64:187–96.

50. Spyrou ID, Anagnostopoulos JS. Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit. Desalination 2010;257:137–49.

51. Vieira F, Ramos HM. Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: a case study. Energy Policy 2008;36:4142–8.