

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

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ СПОЖИВАЧІВ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ПНЄВМО-
ГРАВІТАЦІЙНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу,
групи ДЕ-ЕБ23мг-1
Спеціальності : 141 Електроенергетика
електротехніка та електромеханіка
(код і найменування спеціальності)

_____ / Олексій БОНДАР
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Анатолій ТАРАСЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Юлія ОЛІЙНИК
(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. КАРАЗИНА

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

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 Олексій БОНДАР

1. Тема «Підвищення рівня енергетичної безпеки споживачів електричної енергії шляхом застосування пневмо-гравітаційних накопичувачів 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 ЗАСОБІВ ГРАВІТАЦІЙНОГО НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ КОНЦЕПЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПНЕВМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ, РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ПНЕВМО-ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ
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

_____ (підпис)

Анатолій ТАРАСЕНКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

_____ Олексій БОНДАР
(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)

_____ (підпис)

Олексій БОНДАР

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

_____ (підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 65, рисунків – 11; літературних джерел – 80.

В роботі проведено ґрунтовний критичний аналіз технологій накопичення енергії гравітаційними акумуляторами

Розроблено загальні принципи побудови комплексів фотоелектричних електростанцій з пневмо-гравітаційними накопичувачами енергії

Проаналізовано загальні принципи зберігання енергії стислого повітря

Розроблено концепцію використання ваги самої електростанції у якості робочого середовища пневмо – гравітаційного накопичувача енергії

Розроблено принципову та технологічну схеми пневмо-гравітаційного накопичувача енергії

ЕНЕРГІЯ СТИСЛОГО ПОВІТРЯ, ГРАВІТАЦІЙНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ.

ABSTRACT

Pages of text – 65; pictures – 11; literary sources – 80.

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

Developed general principles for building photovoltaic power plant complexes with pneumatic-gravity energy storage systems

Analyzed general principles for storing compressed air energy

Developed a concept for using the weight of the power plant itself as the working medium of a pneumatic-gravity energy storage system

Developed a principle and technological scheme of a pneumatic-gravity energy storage system

**COMPRESSED AIR ENERGY, GRAVITATIONAL ENERGY STORAGE
SYSTEMS, PHOTOELECTRIC POWER PLANT, RENEWABLE ENERGY
SOURCES.**

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ГРАВІТАЦІЙНОГО НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

- 1.1. Актуальність гравітаційних засобів накопичення енергії
- 1.2. Види гравітаційного накопичення енергії
 - 1.2.1. Рідинні гравітаційні накопичувачі енергії
 - 1.2.2. Твердотільний гравітаційний накопичувач енергії
- 1.3 Практичне застосування гравітаційних накопичувачів енергії
 - 1.3.1. Гірське гравітаційне зберігання енергії
 - 1.3.2. Системи зберігання енергії StEnSea
 - 1.3.3. Система гравітаційного енергетичного банку
 - 1.3.4. Гравітаційний накопичувач енергії з підвішеними вантажами для покинутих шахтних стовбурів

Висновки за першим розділом

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ КОНЦЕПЦІЇ

ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПНСВМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ

- 2.1. Загальний аналіз та галузь застосування технологій зберігання енергії стислого повітря
- 2.2 Теоретичні основи технології зберігання енергії стислого повітря
 - 2.2.1 Основний принцип зберігання енергії стислого повітря
 - 2.2.2 Класифікація пристроїв зберігання стислого повітря
 - 2.2.3 Стан провадження технології CAES
- 2.3 Ключові підсистеми CAES
 - 2.3.1 Підсистема стиснення
 - 2.3.2 Підсистема зберігання повітря
 - 2.3.3 Підсистема регенерації тепла
 - 2.3.4 Підсистема турбогенерації

2.4 Перспективи застосування CAES

2.4.1 Підвищення гнучкості інтелектуальної мережі

2.4.2 Побудова енергетичного інтернету

2.5 Фактори, що стримують розвиток КАЕС

2.5.1 Ефективність зберігання енергії

2.5.2 Вартість будівництва

2.5.3 Ринковий механізм

Висновки за другим розділом

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ПНЕВМО- ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

Висновки за третім розділом

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГНЕ – гравітаційні накопичувачі енергії

РГ – розподілена генерація

ГЕН – графік електричних навантажень

ККД – коефіцієнт корисної дії

СК – суперконденсатори

РП – реактивна потужність

СЕС – сонячна електростанція

ГЕС – гідроелектростанція

ГАЕС – гідроакumuлююча електростанція

ВСТУП

Актуальність дослідження: полягає у тому, що генерація електричної енергії фотоелектричними електростанціями має слабкі прогностичні показники, що в свою чергу значною мірою унеможливує ефективне використання цього засобу генерації. Наразі ця проблема вирішується засобами акумулювання електричної енергії переважно в хімічних акумуляторах з приєднанням станції та акумуляторів до мережі через силові інвертори.

Вартість цього обладнання складає переважну частину загальної вартості фотоелектричної електростанції. Використання пневмо-гравітаційного накопичувача дозволить відмовитися від силових інверторів у складі технологічного обладнання фотоелектричної електростанції та значною мірою здешевити її будівництво. При цьому у якості робочого середовища пневмо-гравітаційного накопичувача енергії використовується вага самої електростанції.

Метою роботи є розробка узагальненого підходу до створення робочої моделі комплексу сонячної електростанції з пневмо-гравітаційним накопичувачем енергії.

Об'єкт дослідження: процес генерації електричної енергії фотоелектричними електростанціями з функцією накопичення електроенергії

Предмет дослідження: технологічна схема фотоелектричної електростанції з пневмо-гравітаційним накопичувачем енергії

Завдання дослідження:

Проведення ґрунтового критичного аналізу технологій накопичення енергії гравітаційними акумуляторами

Розробка загальних принципів побудови комплексів фотоелектричних електростанцій з гравітаційними накопичувачами енергії

Розробка концепції використання ваги самої електростанції у якості робочого середовища пневмо – гравітаційного накопичувача енергії

Розробка принципової та технологічної схем пневмо-гравітаційного накопичувача енергії

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ГРАВІТАЦІЙНОГО НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

1.1. Актуальність гравітаційних засобів накопичення енергії

Для вирішення проблеми дефіциту та забруднення навколишнього середовища традиційної викопної енергії, відновлюваної енергетика останнім часом стрімко розвивається. Представлена енергією вітру та сонця, такій енергії властиві випадковість, мінливість і переривчастість. Нові виклики влади збалансованість і гнучкий вихід буде мати місце у разі його масштабного доступу до енергомережі [1]. В намагання гарантувати безпечну та стабільну роботу енергосистеми після різних типів змінної потужності джерел, зберігання енергії є найефективнішим рішенням. Таким чином, технологія зберігання енергії має нині стають однією з найгарячіших тем енергетичних досліджень [2].

В даний час технологію зберігання енергії можна розділити на такі п'ять основних форм, як механічна накопичувач енергії, накопичувач електрохімічної енергії, накопичувач хімічної енергії, накопичувач електричної енергії і зберігання теплової енергії. Гравітаційний накопичувач енергії є різновидом механічного накопичувача енергії та його робоче середовище зберігання енергії в основному поділяється на воду та тверду речовину. Носієм зберігання енергії є вантаж який піднімається на основі різної висоти для досягнення зарядки та розрядки накопичувача енергії системи [3]. Як показали існуючі дослідження, порівняно з іншими технологіями накопичення енергії технологія гравітаційного зберігання енергії для виробництва електроенергії має такі переваги:

1. Це чисто фізичні, дуже безпечні та екологічні у робочому процесі транспортування ваги, накопичення потенційної енергії та генерування механічної енергії, це генерування електроенергії не включає будь-які хімічні реакції та працює безпечно та надійно. Крім того, він, чистий і

низьковуглецевий, має невеликий вплив на природне середовище, відповідно до концепції сталого та екологічного розвитку [4].

1. Сильна адаптивність до навколишнього середовища, гнучкість у розташуванні за потреби та підходить для «розподіленого» зберігання енергії. Особливих умов і вимог до зберігання ваги, транспортування та виробництво електроенергії. Звідси і електростанції гравітаційного накопичення енергії в основному вільний від обмежень зовнішніх умов, таких як вибір місця та погода, і може бути застосовано гнучко [5].

2. Така генерація електроенергії має тривалий цикл і низьку вартість. Ваги робочого середовища в основному виготовляються з бетону або місцевих матеріалів або інших перероблених матеріалів і можуть бути стабільно працювати десятиліття. Втрата ваги під час роботи незначна [6]. Відповідно до відповідних досліджень, як екологічно чисте та економічно конкурентоспроможне накопичення фізичної енергії, енергія гравітації

зберігання поступово розвивається від теоретичної концепції до практичного застосування [7]. Однак, наявна література не систематично підсумувала останні досягнення відповідних технологій до гравітаційного зберігання енергії та їх застосування в практичних ситуаціях завдяки більш технічним маршрутам накопичення енергії тяжіння. Тому в цій частині роotti аналізуються типи, застосування та майбутній розвиток такого зберігання енергії.

У цьому розділі спочатку представлено типи гравітаційного зберігання енергії та проаналізовано різні технічні шляхи.

Також аналізується практичне застосування гравітаційного зберігання енергії в реальних сценаріях таких як гори, вітрові електростанції, океани, сховища енергії та покинуті шахти.

Зрештою, проаналізовано майбутній перспективний розвиток технології гравітаційного зберігання енергії.

1.2. Види гравітаційного накопичення енергії

Гравітаційні накопичувачі енергії (ГНЕ) — це тип механічного накопичувача енергії, який використовує воду або тверді речовини як робоче середовище та використовує різницю висот середовища для досягнення процесу заряду та розряду. ГНЕ можуть бути поділені на дві підкатегорії: накопичувачі енергії у вологому гравітаційному режимі та сухі накопичувачі енергії. Рідинна сила тяжіння енергії накопичує гравітаційну потенційну енергію на основі води. В основному використовуються електричні генератори і насосні турбіни для досягнення перетворення між потенційною енергією та електричною енергією. загалом, процес його зарядки та розрядки досягається шляхом керування водяним клапаном, електрогенератором поточні та інші фактори. Рідинний накопичувач енергії містить певні типи технологій зберігання, наприклад як PHES (накопичувач гідроелектроенергії), GPM (гравітаційний силовий модуль), NHS (Гідравлічне гідроакумулювання) GBES (новаторське накопичення енергії) та UOSS (підводне) Системи зберігання в океані.

Сухий накопичувач енергії зберігає гравітаційну потенційну енергію на основі важкої тверді маси. В основному для досягнення підйому вантажів і контролю падіння. В основному він містить електричні генератори для перетворення енергії та контролює струми електричного генератора та інші параметри процесу зарядки та розрядки. Типи сухих накопичувачів енергії включають ARES (Advanced Rail Energy Storage), Gravitricity, Energy Vault і LEM-GES (Лінійне електромашинне гравітаційне сховище енергії).

1.2.1. Рідинні гравітаційні накопичувачі енергії

ГАЕС (Гідроакумулюючі електростанції).

Принцип технології насосного накопичення енергії полягає у використанні різного гравітаційного потенціалу енергії води на різних

висотах для перетворення електричної енергії та гравітаційного потенціалу води енергії один до одного. Гідроакумулююча електростанція складається з двох резервуарів різні висоти. Як показано на рис. 1.1, коли потрібне накопичення енергії, електрична енергія приводить в дію електричні двигуни і насоси для підіймають воду з нижнього резервуара у верхній резервуар, а при сил необхідна генерація, вода з верхнього резервуару приводить в дію турбіни та генератори які генерують електроенергію. ГАЕС має переваги надійної технології, високий ККД (70%~85%), велика потужність зберігання енергії (на рівні прядку ГВт*год) і тривалий життєвий цикл (25 - 60 років).

Оскільки для ГАЕС потрібні два резервуари вгорі та внизу за течією, ГАЕС має жорсткі умови географічні вимоги, включаючи необхідність враховувати рельєф, геологію, воду та інші умови, і початкові інвестиції величезні, зазвичай потребують циклу будівництва 8-15 років.

На поточному етапі технології накопичення енергії насосна гідроелектростанція є накопичувачем енергії найдосконаліше застосування, на яке припадає понад 90 % підключених до мережі накопичувачів енергії у всьому світі [8].

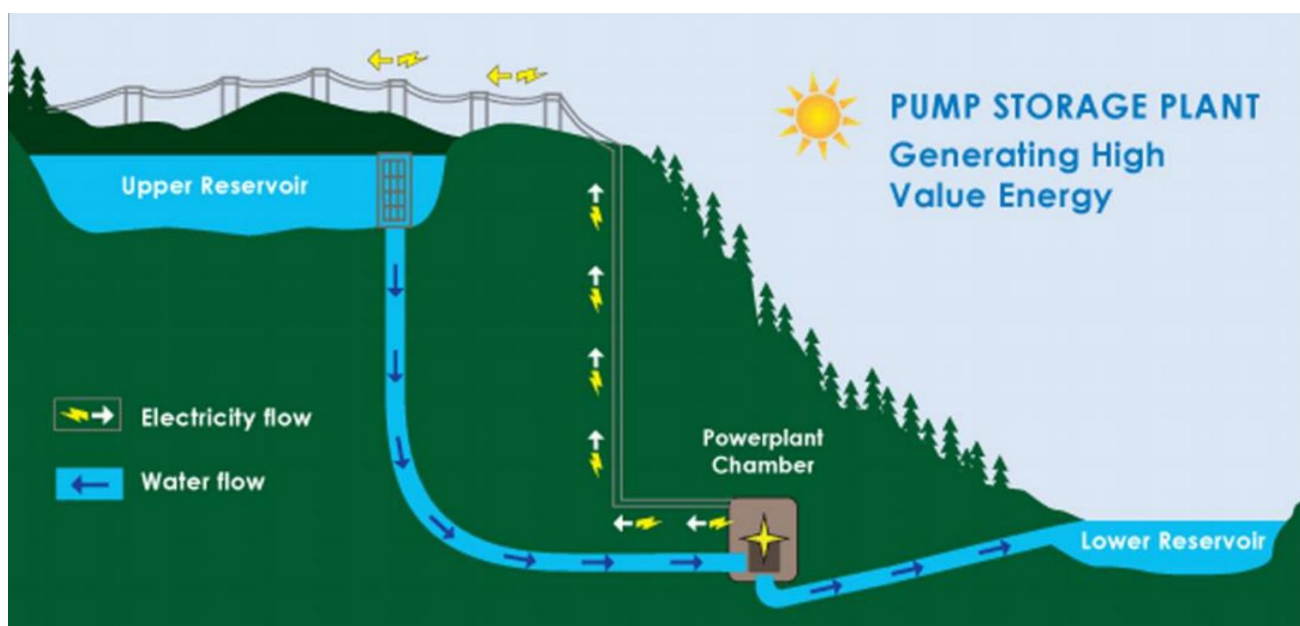


Рис. 1.1 Гідроакумулююча електростанція

Підземні ГАЕС на основі поршня є окремими випадками мають нижній резервуар під землею, щоб забезпечити високу вертикаль переміщення без використання великої площі поверхні. В основному він використовується для дослідження життєздатності використання глибоких шахт і відкритих гірничих робіт [8]. ГАЕС на основі поршня використовує комбінацію води та поршні для накопичення та перетворення енергії. Коли вода штовхає поршні вгору, потенціальна енергія зберігається, і коли поршні падають і штовхають воду в електричний генератор, гравітаційна потенціальна енергія перетворюється на електричну.

ГРМ (гравітаційний силовий модуль).

Гравітаційний силовий модуль (ГСМ) складається з поршня, контейнера для води та з'єднаної зворотної труби до турбінного насоса. ГСМ гідравлічно піднімає величезний поршень у глибокій вертикальній шахті. Поршень опускається, змушуючи воду повертатися через турбіну для виробництва електроенергії (як показано на рис. 1.2). Воловний вал установки промислового масштабу зазвичай має діаметр від 30 до 100 метрів і від 500 до 1000 метрів глибини, що забезпечує електричну потужність від 40 до понад 1000 МВт протягом 4 годин або більше, в залежності від вимог і розміру.

Енергоакумулююча здатність ГСМ обумовлена масою поршня і висотою його підняття. Енергія може зберігатися протягом тривалого часу (приблизно 6~14 годин) на рівні мережі, а ефективність перетворення енергії оцінюється приблизно в 80 % [8]. Збережену енергію можна переробити.

Це забезпечує новий спосіб утилізації електроенергії поза піковим навантаженням та споживання відновлюваної енергії, з невеликою площею землі та високою щільністю енергії.

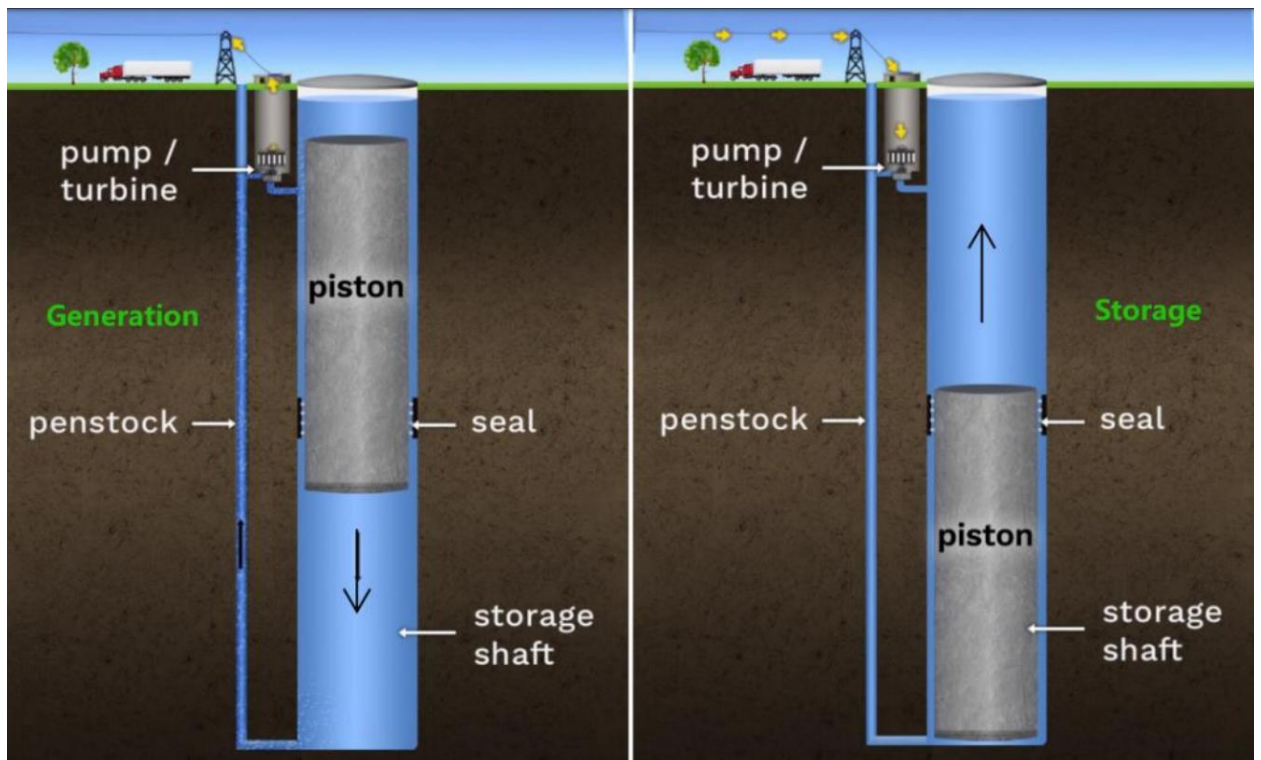


Рис. 1.2 Гравітаційний силовий модуль

Гідравлічне гідроакмулювання

Гідравлічне гідроакмулювання (ГГА) зберігає надлишок енергії, перекачуючи воду для підйому великого циліндричного вантажу. Циліндр опускається, і вода під тиском приводить в дію турбіну для виробництва електроенергії. Поршень в основному будується з використанням будівельних і бетонних або гірничих технологій [10].

Підводні океанічні системи зберігання.

В останні роки технологія підводного океанічного зберігання енергії (ПОЗЕ) з використанням морської води швидко розвивається. За принципом дії ця технологія аналогічна технологіям ГАЕС.

Традиційна ГАЕС вимагає відносно бездоганих географічних умов, включаючи топографію, геологію та водні джерела. Її початкові інвестиції величезні, і його будівництво зазвичай займає 8-15 років. При будівництві

великих водосховищ необхідно затопити великі площі землі та рослинності. Це навіть породжує екологічні та міграційні проблеми. На відміну від ГАЕС за проектом ПОЗЕ океан можна безпосередньо використовувати як нижній резервуар, тому потрібно побудувати лише верхній резервуар. Коли потребує генерації та накопичення електроенергії, морська вода скидається з верхнього резервуару в океан через насосно-турбінний агрегат спочатку, а потім гравітаційну потенційну енергію морської води перетворюють на електричну енергію. Згодом морська вода перекачується у верхній резервуар і зберігається у вигляді гравітаційної потенційної енергії морської води (як показано на рис. 1.3). Цю технологію можна застосовувати у прибережних районах та на островах і можна зменшити шкоду навколишньому середовищу та зменшити вартість будівництва [11].

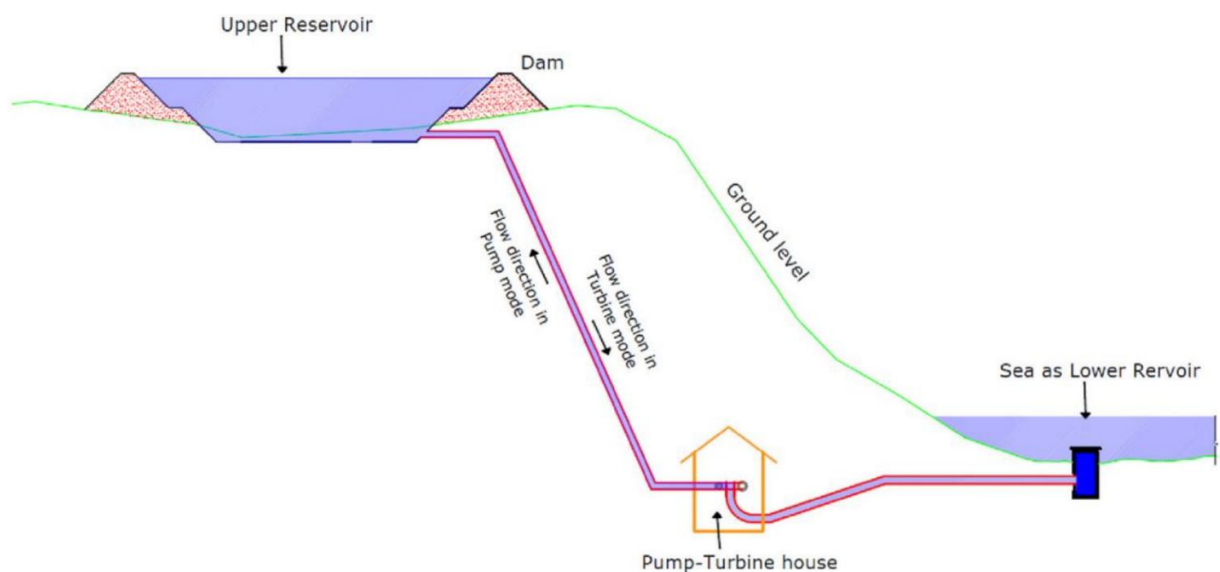


Рис. 1.3 Технологія підводної океанічної системи зберігання

Підводна система зберігання енергії на стисненому повітрі може бути застосована в районах з відповідною глибиною води. Як ідеальне глибоководне джерело, океан є бажаним місцем для застосування технології зберігання енергії під водою зі стисненим повітрям. Така технологія може бути широко використана накопичувати енергію в середньому та великому масштабі в прибережних районах, на островах, океанських платформах і в

морі на фермах відновлюваної енергії. Вищезазначена система може бути ефективно використана в поєднанні з офшорною вітровою енергосистемою.

Система перетворення на океанській платформі може перетворювати електроенергію, вироблену морськими енергетичними фермами у стиснене повітря високого тиску та зберігати його в підводному газовому накопичувачі. Коли таке стиснене повітря буде випущено для виробництва електроенергії та стабілізації роботи енергосистеми то електроенергія передається в берегову мережу через підводний кабель. Це може збільшити коефіцієнт використання відновлюваної енергії.

1.2.2. Твердотільний гравітаційний накопичувач енергії

Тяговий залізничний накопичувач енергії

Тяговий залізничний накопичувач енергії (ТЗНЕ) — це система тягового приводу на рейках. Він використовує надлишок відновлюваної енергії або енергію мережі щоб транспортувати маси на більшу висоту залізницею. Система розвантажується, коли блоки опускаються, кожен вагою приблизно 45-64 тони і виконанням маршруту до 16 км. Ця система зберігання енергії використовує переваги гірської місцевості та залізничного транспорту для досягнення високої ємності зберігання енергії зовнішнього середовища [13]. Однак ТЗНЕ має топографічні обмеження, оскільки вимагає його встановлення на території з перепадами висоти. Окрім цього така система має високу вартість цивільного будівництва, потребує вирівнювання схилу, і подальшої структурної оптимізації.

Твердотільні гравітаційні накопичувачі енергії.

Принцип дії твердотільних гравітаційних накопичувачів енергії. (ТГНЕ) заснований на підйомі та опусканні важкого блоку вздовж

вертикальної осі землі. Це використовує важковаговики, які випускаються у вертикальну шахту за допомогою лебідок, які подвоюються як динамомашини. Ця технологія спрямована на використання старих або законсервованих шахт, щоб зменшити витрати на гірничі роботи. Отже як правило, він використовується в шахтах і будівельних середовищах.

Гравітаційні енергетичні банки.

Подібно до ТГНЕ, гравітаційні енергетичні банки (ГЕБ) перетворюють енергію шляхом підйому та опускання вантажу. ГЕБ пропонує рішення для накопичення та генерації енергії гравітації на основі башти для зберігання бетонних блоків. Коли в мережі присутній надлишок електричної енергії, кран піднімає бетонні блоки на поверхню землі та складає їх у високу вежу перетворюючи електричну енергію на потенційну енергію вежі з бетонних блоків, яка є фазою зберігання; коли потрібна електроенергія, потрібні бетонні блоки спускаються послідовно, вивільняючи велику потенційну енергію та перетворюючи її на електрику.

Лінійне електричне машинне гравітаційне накопичення енергії (ЛЕМГНЕ)

Гравітаційний накопичувач енергії лінійної електричної машини складається з поршня, валу та електричної машини. Він вирівнюється та опускається вниз по поршню, щоб накопичити гравітаційну потенційну енергію та перетворювати потенціальну енергію в електричну. Механізм подібний до ТГНЕ та інших твердотільних (сухих) гравітаційних накопичувачів енергії, але оскільки воно замінює мотузку магнітом, ефективність буде набагато вищою.

1.3 Практичне застосування гравітаційних накопичувачів енергії

Існує багато структур рішень для гравітаційного зберігання енергії зі своїми перевагами недоліки, тому в конструкції слід поєднувати різні

кліматичні умови та особливості рельєфу гравітаційних систем зберігання енергії під час застосування практичних сценаріїв. Наступне узагальнює застосування різних типів гравітаційного зберігання енергії в практичних сценаріях

1.3.1. Гірське гравітаційне зберігання енергії

Концепція Mountain Gravity Energy Storage, або MGES, передбачає зберігання надлишкової енергії з сітку, піднявши пісок або гравій на вищу висоту. Це досягається за допомогою пари кранів, які завантажте матеріал у контейнери для зберігання, перш ніж підняти їх на висоту на тросі.

Зберігання енергії гравітації за допомогою падіння з гори та підйому твердих тягарів є більшим стабільні за структурою та міцніші за несучою здатністю, ніж штучні конструкції гора

Гравітаційне накопичення енергії (MGES), запропоноване Науково-дослідним інститутом IIASA, в основному використовує місцевість круті гори для накопичення енергії через потенціальну енергію гравію, як показано на рис.

1.4. Коли потужності достатньо, електрична система, подібна до гірськокожного підйомника, застосовується для підйому контейнера, заповненого гравієм на вершину гори для зберігання; коли енергоспоживання досягає піку, покладається на силу тяжіння транспортувати гравій із верхньої вершини назад на землю та виробляти електроенергію, вивільняючи потенціальна енергія гравію. В інституті вважають, що гірська гравітаційна система зберігання енергії довша тривалість і більший масштаб зберігання енергії, ніж система накопичення енергії літєвої батареї [14].

ARES (Advanced Rail Energy Storage) запропонував у 2014 році систему локомотивної рампи, де локомотиви піднімаються та спускаються по коліях для накопичення та вивільнення енергії, будівництво проекту розпочалося в Неваді у 2020 році. Технологія успішно випробувана в пілотних проектах і її перша черга розгортання буде підключено до мережі Каліфорнії.

1.3.2. Системи зберігання енергії StEnSea

Ідею проекту StEnSea запропонував німецький вчений Горст Шмідт-Бокінг у 2011 році [15]. Накопичувач енергії StEnSea - це порожнисті сфери (внутрішній діаметр близько 30 метрів) і кожна сфера містить 2 набори пристроїв всередині:

1 - водяні насоси;

2- гідроелектрогенератори

(як показано на рис. 1.4). Ці сфери будуть розміщені на морському дні на глибині близько 700 метрів прибережній зоні, і коли в енергосистемі є надлишок потужності, надлишок потужності використовується для керування насосом для скидання води всередині пристрою в море. Коли енергосистема потребує енергії пристрій для вироблення електроенергії, відкриє клапан, щоб ввести морську воду для приводу гідроелектростанції генератора, таким чином завершуючи виробництво електроенергії в пікові періоди використання. Розробники проекту StEnSea очікують, що якщо більше 80 підводних накопичувачів енергії будуть об'єднані для генерації електроенергії, масштаб накопичення енергії буде достатнім, щоб ефективно реагувати на потребу в електроенергії [16]. Цей проект допомагає розвивати та використовувати накопичувач енергії морської води, але поточні труднощі полягають у масовому виробництві сферичних накопичувачів енергії та їх монтажі також мають бути оптимізовані засоби зв'язку для підтримки підводної системи та електромережі підводної передачі.

1.3.3. Система гравітаційного енергетичного банку

У 2018 році швейцарська компанія з гравітаційного зберігання енергії Energy Vault представила свою модель інноваційного гравітаційного накопичувача енергії з рішенням накопичення енергії, задуманим для

будівництва гігантської сталеві вежі для зберігання енергії, яка спирається на гравітацію та 35 тон цегли для зберігання та вивільнення енергії [17].

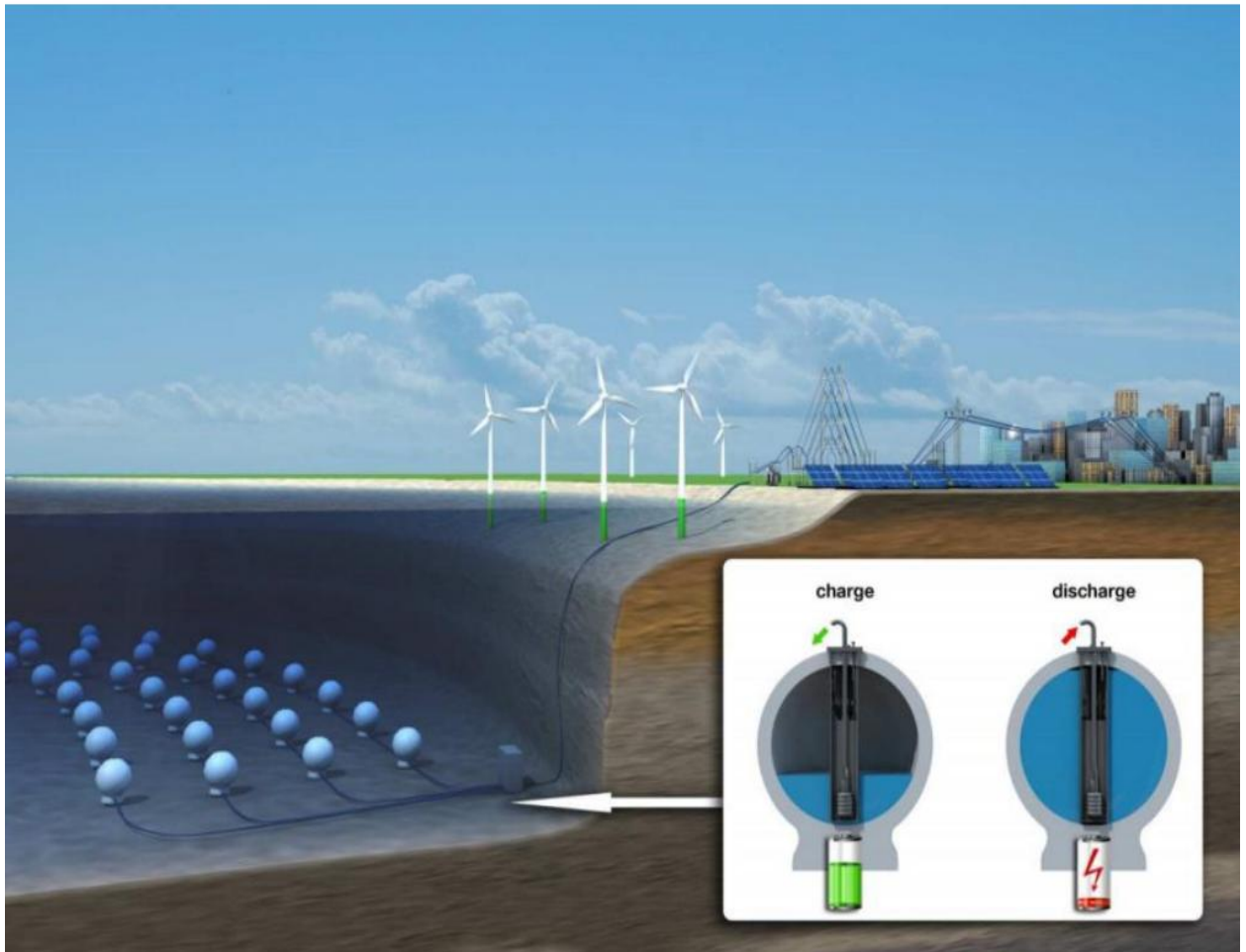


Рисунок 1.4 Принцип дії проекту проекту StEnSea

Коли попит на електроенергію низький, кран використовує надлишок електроенергії з мережі, щоб піднімати цеглу та складати її зверху. Коли попит на електроенергію зростає, цегла опускається, щоб вивільнити кінетичну енергію в мережу.

1.3.4. Гравітаційний накопичувач енергії з підвішеними вантажами для покинутих шахтних стовбурів

Гравітаційна система зберігання енергії розміщується на землі або під водою, зазвичай під впливом метеорологічних умов або зміни в морській екології, в практичних застосуваннях, використання.

Використання підземного простору покинутих шахт для побудови гравітаційної системи зберігання енергії став новою тенденцією. Британська компанія Gravitricity використовує покинуті шахти для будівництва накопичувачів енергії, реконструюючи покинуті бурові стовбури глибиною 150–1500 метрів після завершення трансформації використання електродвигунів для багаторазового підйому та опускання важких об'єктів вагою 500-5000 тон [18].

Переваги цієї системи зберігання енергії – це низька вартість модернізації покинутих шахт, краща безпека та менше шкоди природному середовищу. З приблизно 85 000 покинутих старих шахт у Австралії, 3000 зараз реабілітуються, перепрофільовуючи існуючу інфраструктуру покинутих шахт, розглядаючи ризики від використання покинутих шахт, які не використовуються протягом тривалого часу.

Висновки за першим розділом

Оскільки глобальні зміни клімату та питання енергетичного середовища стають все більш напруженими, серйозність зберігання енергії буде використовуватися в більш широкому діапазоні технологій зберігання енергії через його високу екологічність і загальна довговічність в довгостроковій перспективі. Ці функції можуть допомогти впоратися з проблема забруднення та нестачі енергії.

Існує багато варіантів для гравітаційного зберігання енергії зі своїми перевагами та недоліками, тому при проектуванні гравітаційних систем накопичення енергії слід поєднувати різні кліматичні умови та особливості рельєфу під час застосування практичних сценаріїв.

Гравітаційний накопичувач енергії заснований на перепадах висот гір і використанні покинутих шахт стане центром досліджень у майбутніх проектах. Це пов'язано з тим, що гори мають більш міцну і стабільну несучу здатність. Переробка покинутих шахт допомагає зменшити вплив на навколишнє середовище, скоротити термін будівництва ГНЕ однак оптимізація будівельного майданчика і технічні деталі потрібно вивчати глибоко.

Статус ГАЕС як основного системного накопичувача енергії наразі є домінуючим.

Всебічне використання території океану для розвитку систем генерації відновлюваними джерелами енергії зробить технологію StEnSea популярною та перспективною

Отже, незалежно від того, на землі чи в океані, зараз чи в майбутньому, гравітаційне накопичення енергії має багатообіцяючі переваги як технологія зберігання.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ КОНЦЕПЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПНЄВМАТИЧНИХ СИСТЕМАХ

2.1. Загальний аналіз та галузь застосування технологій зберігання енергії стислого повітря

Розвиток і використання відновлюваних джерел енергії важливий засіб від всесвітньої кризи викопної енергії та проблеми забруднення навколишнього середовища [1]. Через мінливість і випадковість відновлюваних джерел енергії, наприклад вітру і сонячної енергії, інтеграція таких енергетичних ресурсів у енергетична мережа накладає великі проблеми на безпечну роботу та якість електроенергії сучасних енергосистем [2]. Таким чином, як безпечно, ефективно використовувати відновлювані джерела енергії економічний спосіб привернув велику увагу.

Технологія зберігання енергії є важливим засобом для розв'язків перераховані вище проблеми. З можливістю зміни форми профіль навантаження, система зберігання енергії (СЗЕ) додає додаткову гнучкість у роботі системи та допомагає використовувати відновлювану енергетику у великих масштабах [3]. А тим часом масштабно технологія зберігання енергії може зменшити розрив між піковим навантаженням та їх спадінням для підвищення ефективності генеруючих активів. Безсумнівно, ESS відіграє важливу роль у розумна мережа та енергетичний Інтернет і стає гарячою темою в галузі енергетичних досліджень [4, 5].

Є кілька продуктивних технологій зберігання енергії, в тому числі хімічні батареї накопичувачів енергії, насосні акумулятори та зберігання енергії на стисненому повітрі (ЗЕСП) [4, 5]. Серед для них технологія накопичення енергії хімічних батарей є основною найпопулярніший, але інвестиції та вартість переробки, а також потенційні екологічні проблеми обмежують її широкомасштабне застосування. Гідроакумуючі системи широко застосовуються в зона багатих водних ресурсів. Однак особливі географічні умови обмежують доступне місце та потенційна екологічна

шкода перешкоджає подальшій популяризації насосної акумуляції. З особливостями меншої конструкції обмеження, висока ефективність і екологічність,

Очікується, що ЗЕСП буде однією з найбільш перспективних енергетичних технологій зберігання для вирішення багатьох проблем, з якими стикається всебічне проникнення відновлюваної енергії в інтелектуальні мережі та мережу Інтернет.

Ефективність гібридного накопичення енергії шляхом поєднання мікро ЗЕСП з маховиком СЗЕ моделюється та перевіряється в [6]. ЗЕСП і гібридна СЗЕ на основі суперконденсаторів також є перевірено в [7]. Спільна робота енергосистеми з урахуванням ГАЕС та розподілених ЗЕСП досліджена в [8].

Існує дві великі електростанції ЗЕСП, включаючи Huntorf і McIntosh, які знаходяться в комерційній експлуатації, і багато інших заводів ЗЕСП знаходяться в стадії будівництва [5, 9]. Крім того, ряд науково-дослідних установ і компаній запропонували багато інновацій архітектури ЗЕСП.

Інститут технічної теплофізики Китайської академії наук (IET-CAS) почав вивчення надкритичної технології ЗЕСП шляхом поєднання регулярних технологій ЗЕСП і зберігання енергії в рідкому повітрі (LAES) технології з 2009 р. На даний момент IET-CAS завершив а експериментальна система потужністю 15 кВт і демонстраційна потужністю 1,5 МВт системи [10, 11]. За фінансування проекту ключових технологій Державної електромережі, Університет Цінхуа, China Electric Power Науково-дослідний інститут (CEPRI) і Технічний інститут фізики та хімії Китайської академії наук побудували CAES без додаткового вогню потужністю 500 кВт (NSF-ЗЕСП) і завершив польові випробування в 2014 р. [12]. Заборгованість до багатообіцяючих перспектив технології ЗЕСП, Білл Гейтс інвестував у проект ЗЕСП відомої компанії LightSail Energy Компанія ЗЕСП, яка приваблює багатьох людей платити багато більше уваги до технології ЗЕСП.

Безсумнівно, технологія ЗЕСП все ще знаходиться на ранній стадії розвитку. Щоб глибоко зрозуміти технологію ЗЕСП і досліджувати майбутні напрямки застосування, ця стаття представляє фундаментальні принципи та сучасний рівень

Технологія ЗЕСП та аналіз пов'язаних ключових технологій і прогрес досліджень. Перспективи застосування ЗЕСП в розумних мережах та енергетичному Інтернеті також сприяють розробці та застосування технології ЗЕСП.

2.2 Теоретичні основи технології зберігання енергії стислого повітря

2.2.1 Основний принцип зберігання енергії стислого повітря

ЗЕСП — це технологія зберігання енергії, заснована на технології газових турбін, яка використовує електроенергію для стиснення повітря та зберігає повітря під високим тиском у резервуарі для зберігання за допомогою підземна соляна печера, підземна шахта, вичерпані свердловини, або газовій камері під час періоду зберігання енергії та викидів стиснене повітря для приводу турбіни для виробництва електроенергії на етапі живлення [13, 14]. Простіше кажучи, термін служби CAES залежить від його механічного рівня, це означає, що нелегко стати втомою, як батарея. Зазвичай термін служби ЗЕСП становить від 30 до 40 років.

Під час заряджання компресор використовує електроенергію від час пікової генерації вітрових та сонячних електростанцій для стиснення навколишнього повітря. Споживана потужність кожного ступеня стиснення визначається як:

$$P_{c,i} = \frac{k}{k-1} \frac{Q_{m,c} R_g T_{c,i}^{\text{in}}}{\eta_{c,i}} \left[(\beta_{c,i})^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

де k – показник адіабати;

$Q_{m,c}$ – масова витрата повітря;

R_g – повітряно-газова константа;

$T_{c,i}$ – температура повітря на вході компресор;

$\eta_{c,i}$ – ККД компресора;

$\beta_{c,i}$ – ступінь стиснення.

Температура повітря на виході кожного ступеня стиснення можна виразити як:

$$T_{c,i}^{\text{out}} = T_{c,i}^{\text{in}} \left[\frac{(\beta_{c,i})^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{c,i}} + 1 \right]$$

де $T_{c,i}^{\text{out}}$ – температура повітря на виході з компресора.

Для n -ступінчастого компресора та часу зарядки t_c , можна розрахувати загальну спожиту електроенергію компресора

як:

$$W_c = \eta_a \sum_{i=1}^n P_{c,i} t_c$$

де η_a – ККД повітряного компресора.

Використання адіабатичної ефективності для обчислення фактичного валу потужність турбіни, потужність кожної турбіни задовольняє:

$$P_{e,i} = \frac{k}{k-1} Q_{m,e} R_g T_{e,i} \eta_{e,i} \left[1 - (\pi_{e,i})^{-\frac{k-1}{k}} \right]$$

де $Q_{m,e}$ – масова витрата турбіни;

$\eta_{e,i}$ — турбіна ефективність;

$P_{e,i}$ – коефіцієнт розширення турбіни.

Для m -ступеневої турбіни з часом розряду t_e , загальну вихідну електроенергію можна розрахувати за формулою:

$$W_e = \eta_g \sum_{i=1}^m P_{e,i} t_e$$

де η_g – ККД генератора.

2.2.2 Класифікація пристроїв зберігання стислого повітря

Дотепер існували різні розроблені архітектури пристроїв ЗЕСП. За критерієм, потрібне чи ні спалювання палива, ЗЕСП можна класифікувати на ЗЕСП з додатковим обстрілом (SF-CAES) і NSF-CAES.

1) SF-CAES

За винятком фундаментальних структур CAES, архітектура SFCAES потребує спалювання палива під час енергопостачання та процесу розрядки для досягнення циклу, як на рисунку 2.1

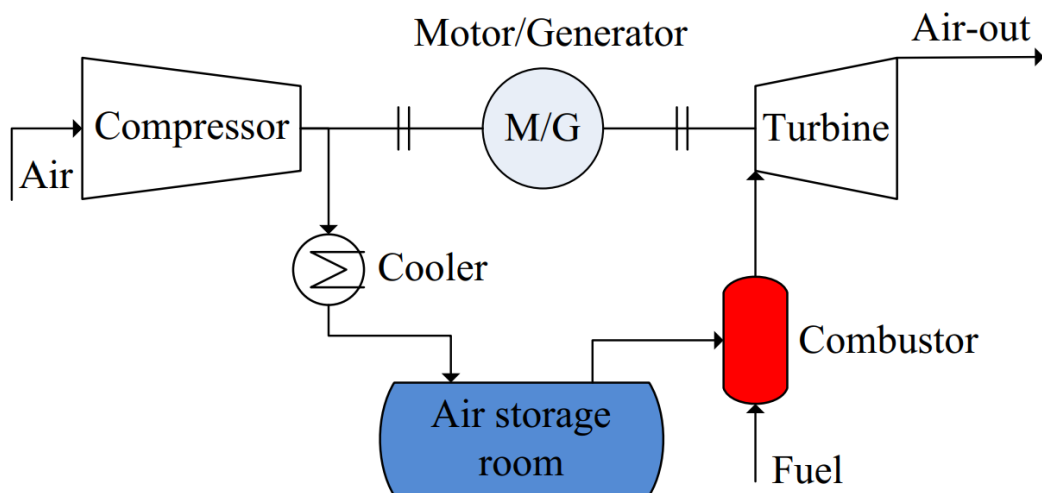


Рис. 2.1. Система SF-CAES

Методика SF-CAES створена за принципом поділ процесу стиснення і розширення газу турбогенератор. Компресор і турбіна газової турбіни зазвичай працюють одночасно, тоді як SFCAES працюють окремо. Тим часом компресор газу турбіна споживає певну частину виробленої електроенергії турбіна для стиснення навколишнього повітря. Проте немає потреби споживати електроенергію, вироблену турбіною під час фази стиснення повітря SF-CAES. У зв'язку з цим SF-CAES система сильно залежить від викопного палива, а також забруднення навколишнього середовища внаслідок спалювання газу.

2) NSF-CAES

На відміну від SF-CAES, NSF-CAES збирає, зберігає та повторно використовує термічне стиснення для нагрівання стисненого надходження повітря в турбіну на основі технології регенерації тепла. Типові розрахункові схеми системи NSF-CAES включають неадіабатичне стиснення без додаткового розжарення, адіабатичне стиснення з одноступеневою тепловою енергією рециркуляція і адіабатичне стиснення з багатоступінчатим утилізація теплової енергії. Схема системи NSF-CAES зображено на рис. 2.

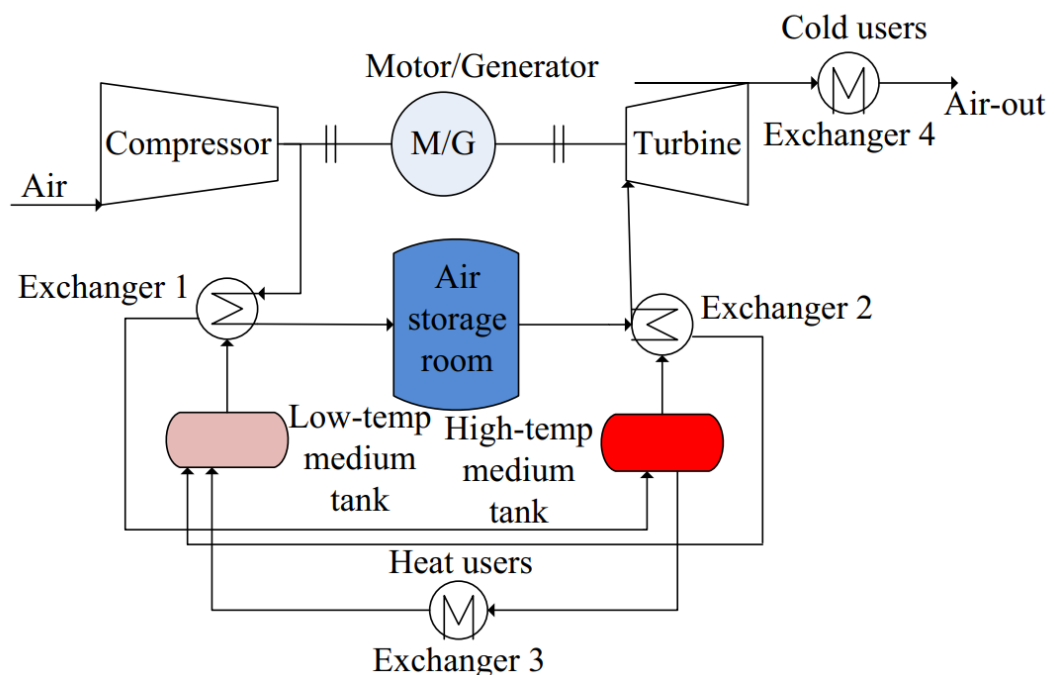


Рисунок 2.2 Система NSF-CAES

NSF-CAES не залежить від палива шляхом заміни додаткового спалювання палива з теплом стиснення, таким чином, немає утворюється шкідливий газ. Таку систему можна використовувати для нагрівання з накопиченим теплом стиснення та для охолодження з низькотемпературним повітрям, що випускається з турбіни. NSF-CAES може постачати холод, тепло та електроенергію одночасно, яка реалізує комплексне використання енергії та підвищує ефективність системи. Згаданий вище NSF-CAES зазвичай використовує газоподібне повітря як переробне середовище, LAES є ще однією спеціальною технікою NSFCAES з рідким повітрям як переробним середовищем. LAES використовує накопичену енергію холоду для охолодження та розрідження стисненого повітря під високим тиском і зберігає його в низькотемпературному адіабатичному контейнері під час процесу заряджання.

У час пік рідке повітря поглинає тепло використання теплообмінника після підвищення тиску та холод, що виділяється в процесі газифікації, може бути перероблений і зберігається, потім повітря під високим тиском поглинає збережене тепло стиснення перед відправкою в турбіну, а потім приводить в дію двигун для виробництва електроенергії. Діаграма системи LAES проілюстрована на рисунку. 2.3.

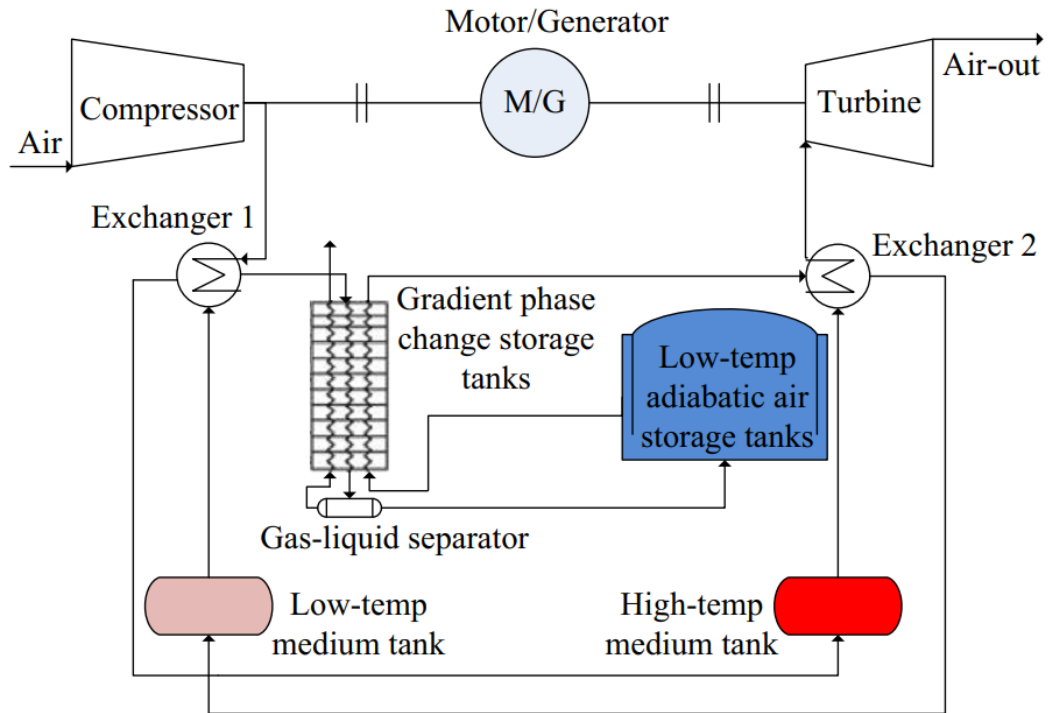


Рисунок 2.3 Система LAES

2.2.3 Стан провадження технології CAES

1) Силу систему CAES потужністю понад 50 МВт можна віднести до категорії великомасштабних [14]. Існує дві комерційні установки CAES, включаючи установку Huntorf розташовану у Німеччині та завод McIntosh у США. Завод Huntorf CAES було завершено в 1978 році все ще працює. Потужність компресора і вихідна потужність Huntorf – 60 і 321 МВт відповідно. Huntorf пристрій можна заряджати безперервно протягом 8 годин, щоб забезпечити 2 год виробництво електроенергії [15, 16]. Завод Huntorf приймає архітектуру SFCAES, стиснене повітря зберігається на 600 м глибині видобутої соляної печери об'ємом 310 000 м³, а також тиск зберігання знаходиться в межах від 5 до 7 МПа [15]. Відношення електроенергії спалювання природного газу до загальної виробленої електроенергії може досягати 42 % та щорічно досягла 294465 МВт-год у 2007 р. [17]. Завдяки архітектурі SFCAES завод Huntorf має сильну

залежність від природного газу, виробництво електроенергії разом з багатьма викиди вуглецю. Загальні викиди вуглецю в 2007р досягла 156 540 т [17], що суперечить вимогам сучасного низьковуглецевого суспільства до низьких викидів вуглецю.

Завод McIntosh CAES, який був побудований в 1991 році розташований в Алабамі, є другим комерційним заводом CAES. Він складається з компресора потужністю 50 МВт і потужністю 110 МВт генераційної установки, і розрахована на безперервну 41 год стиснення та 26 год живлення [16]. Печера підземного газосховища розташована в 450-метровому шарі кам'яної солі шару з робочим тиском від 4,5 до 7,4 МПа [16].

На відміну від заводу Huntorf, завод McIntosh CAES використовує вихлоп високотемпературне повітря останнього ступеня газової турбіни до попередньо підігріти вхід газової турбіни через теплообмінник. Таким чином, теплова ефективність системи збільшується на 25 %, а ефективність усієї системи покращується до 54 %. Однак, схожий на завод Huntorf, завод McIntosh все ще використовує архітектуру SF-CAES, що збільшує ризик забруднення навколишнього середовища.

Слід пояснити, що дослідницький процес великий масштаб CAES не розвивається гладко. Ряд системи CAES були припинені з різних причин.

Розпочата в 2003 році CAES в Айові потужністю 270 МВт була призупинена у 2011 році через геологічні умови та економічні причини [18]. CAES в Огайо потужністю 270 МВт, розпочата в 2009 році, було оголошено про призупинення у 2013 році через економічні причини міркування [19]. Отже, вартість будівництва системи становить один із головних факторів, що обмежують розвиток CAES.

Зі зростанням попиту на ESS у розумних мережах було розроблено кілька вдосконалених архітектур CAES. RWE Power, найбільша німецька енергетична компанія, запустила установку ADELE CAES на основі адіабати

стиснення з одноступеневою технікою термічної рециркуляції в 2010 р. [20]. Повітря на виході з компресора під час енергії очікується, що температура процесу зберігання досягне 600 С і 10 МПа [21]. Для зберігання повітря реалізований теплоаккумулятор компресійний термічний. Зібране тепло використовується для нагрівання вхідне повітря турбіни під час скидання енергії процес, а також для покращення можливостей виробництва електроенергії. Зазначимо, що проєктована установка ADELE має потужність 90 МВт турбіна, і очікується, що спроектована вся ефективність досягають 70 %. Однак його будівництво більше не передбачається через економічні проблеми.

2) Маломасштабна система CAES

За винятком великої системи CAES потужністю 50 МВт, декілька компанії та інститути досліджували малий масштаб системи CAES потужністю менше 50 МВт [14].

CAES Kamisunagawa потужністю 2 МВт, розташована в Сорачі Район, Хоккайдо, почав будуватися в 1998 році і має введена в експлуатацію з 2001 р. Ця система CAES використовує підземну скельну структуру - отвір з глибиною 400 м і об'єм для зберігання близько 1600 м³ стисненого повітря, а максимальний тиск досягає 8 МПа.

Система Kamisunagawa є SF-CAES. Лідер техніки LAES, Highview Power Storage розташований у Британії, створив дослідний завод LAES з а 350 кВт/2,5 МВт-год у Слау, Великий Лондон.

Завод експлуатується та підключений до державної мережі Великобританії з липня 2011 р. [22]. Ефективність перетворення від електроенергії до електроенергії становить близько 8 % [22]. Воно варте згадуючи, що низькотемпературна енергетична система о Highview використовує надлишок енергії для перетворення повітря рідкий і зберігає повітря в адіабатичному контейнері з низькою температурою. У час пік рідке

повітря скидається в закритий простір з високою температурою до випаровування один, а турбіна приводиться в дію для генерації електроенергії. Ефективність системи очікується покращено з 25 % до 70 % завдяки поєднанню LAES система з пристроєм, що генерує відходи тепла, який може використовувати для зрідження повітря. Докомерційна LAES потужністю 5 МВт.

Пілотний завод будується в Пілсворті, Великий Манчестер та концептуальний LAES потужністю 200 МВт/1,2 ГВт-год завод також запропоновано Highview [22]. Крім того, другий етап вітро-сонячно-акумулюючої-передачі проект у Чжанбеї, Китай, призначений для використання LAES техніка для Зимових Олімпійських ігор з низьким вмістом вуглецю. Lightsail Energy, заснована в 2009 році, призначена для малого розмір, модульні рішення CAES і виробництво резервуари для зберігання газів під тиском. В основному продукт використовували зворотно-поступальний композитний поршневий компресор/розширювач потужністю 250 кВт [23]. Lightsail Energy використала свою першу ESS наприкінці 2015 року.

Зараз цей інститут починає дослідження передової системи CAES потужністю 10 МВт. У 2014 році Університет Цінхуа розробив демонстраційну систему NSFCAES потужністю 500 кВт, тобто TICC-500. TICC-500 використовує структуру NSF-CAES і завершив експеримент спільного постачання холоду, тепла та електроенергії. Він має такі переваги, як нульовий рівень викидів вуглецю, високий ефективність і гнучкість роботи. Тиск повітря в діапазоні від 3 до 11 МПа. TICC-500 використовує 5,5 год зарядки обробляти під час непікового часу, щоб реалізувати процес розрядки протягом 1 години під час пікового навантаження. Обсяг ємності 100 м³, а ККД від електрики дорівнює до 33 % [12, 26]. На це впливають різні фактори ефективність TICC-500, ефективність можна підвищити шляхом оптимізації ключових параметрів системи, проаналізованих у [27]. Крім того,

ТІСС-500 приймає воду як накопичувач теплової енергії (TES) для рециркуляції тепла.

Ефективність можна додатково підвищити, що призводить до конкурентного ринку теплопровідної нафти та розпавленої солі можна використовувати як середовище TES. Тим часом Цінхуа

Команда CAES створила концентруючу сонячну установку потужністю 100 кВт гібридна система NSF-CAES, яка називається CSHC-100, автор використання колекторів для збирання сонячної енергії в Цинхаї університет. Крім того, команда розробила NSFCAES потужністю 50 МВт із системою накопичення повітря та трубопроводом із соляним шаром на основі сталі 10 МВт NSF-CAES для Jintan, Jiangsu та Naixi, Qinghai, яка заснована на географічних умовах цих двох областей. Очікується, що ефективність перетворення електроенергії в електроенергію досягне 52,4% і 50.3 % відповідно, які є достатніми для комерційних операцій.

Хоча Китай та інші країни досліджували обидва великомасштабні та дрібномасштабні CAES системи, ключові технічні прориви, пов'язані зі стисненням, зберіганням повітря, термальне накопичення та виробництво електроенергії турбінами все ще залишаються бажано, і ефективність більшості сучасних установок CAES може бути вдосконаленим. Для подальшого підвищення ефективності ринку конкретоспроможність ЦАЕС, нові теплові технології та прогрес у матеріалознавстві мають велике значення.

2.3 Ключові підсистеми CAES

З точки зору функції та принципу, CAES є головним складається з кількох ключових підсистем, включаючи підсистему стиснення, підсистему зберігання повітря, регенерацію тепла підсистема та підсистема виробництва електроенергії. Підсистема стиснення використовує надлишок електроенергії

для приводу компресорів для виробництва повітря під високим тиском, а також високотемпературне стиснення теплової енергії повітря.

Підсистема зберігання використовується для зберігання повітря під високим тиском, що створюється компресором, таким чином, для зберігання молекулярного потенційної енергії одночасно. Під час розширення підсистема регенерації тепла нагріває повітря під високим тиском, щоб покращити вхідну ентальпію запуску точка розширення повітря. Генерація електроенергії реалізована підсистема для приводу турбіни для вироблення електрики з повітрям високої температури, отже, обробка перетворення молекулярної потенціальної енергії та теплової енергії в електрику. Варто зазначити, що компресор - це електричний інтерфейс для зберігання енергії, а генератор є електричним інтерфейсом для живлення енергії. Детальніше про кожну підсистему описано далі впливає.

2.3.1 Підсистема стиснення

Підсистема стиснення є основною частиною CAES. Компресор має характеристики великої витрати повітря, висока ефективність, високий ступінь стиснення та велика зміна протитиску, що є великою відмінністю від компресора у газовій турбіні та загальнопромислового компресора [28–30]. Існують різні способи стиснення повітря схеми за розміром і принципом дії система CAES.

Структура багатоступеневого стиснення, міжступеневе стиснення і післяступеневе охолодження, що складається з осьового компресора стадія низького тиску та відцентровий компресор на стадії високого тиску часто використовуються в конструкції великомасштабна електростанція CAES. Така схема стиснення зрілий з точки зору проектування та виробництва і має був прийнятий на заводах Huntorf і McIntosh CAES [5].

Однак для розширеного адіабатичного CAES (AA-CAES), осьовий або відцентровий компресор, який краще працює продуктивність, великий коефіцієнт тиску та високе підвищення температури повинні бути розгорнуті для забезпечення високої ефективності адіабатичного стиснення, щоб страждати від більш високого коефіцієнта тиску та температура вихлопу, як використовується в ADELE NSF-C резервуар для зберігання. Тим часом витрата повітря в системі є відносно невеликою. Тому доцільніше використовувати одноступінчастий або багатоступінчастий поршневий компресор, однак вартість інвестицій також висока.

Під час проведення необхідно враховувати кілька факторів проектування блок-схеми стиснення. Деякі з них перераховані наступним чином.

- 1) Компресор працює в нестационарному стані під час всієї операції.
- 2) Процес стиснення потрібен для приблизного визначення адіабатичне стиснення для зменшення втрат теплової енергії.
- 3) Припускається температура повітря на виході кожного компресора бути близько до відправки теплової ESS.
- 4) Потенційна проблема безпеки повітряного балона через вищий температури на виході, яка викликана стрибком ступінь стиснення внаслідок коливань тиску резервуара для зберігання повітря також слід враховувати рахунок.

Згідно з основними знаннями, втрати потужності багатоступінчастого стиснення нижчі, ніж одноступінчастого, і так далі впливає на температуру повітря на виході. Пропонується оптимізувати параметри всієї системи, включаючи компресор місткість, номер ступеня, масова витрата, температура повітря на виході та час заряджання комплексно, а також оцінити продуктивність підсистеми стиснення повітря враховуючи такі показники, як втрати потужності та температура повітря вихідного отвору компресора.

2.3.2 Підсистема зберігання повітря

Ємність підсистеми зберігання повітря визначає загальну потужність системи, яка є ключовою технологією для реалізувати масштабне зберігання повітря під високим тиском.

Великі заводи CAES зазвичай використовують підземну сільову печеру або вручну викопану підземну печеру для зберігання стиснене повітря [31]. Незалежно від трансформації або повністю ручне розкопування, кавернне зберігання газу вимагає жорсткі вимоги до географічних умов. Спочатку запланований проект CAES в Айові припинено через стан пористого пісковика. Мабуть, вибір простору для зберігання повітря стає серйозним фактором, що обмежує просування CAES [5, 32, 33].

При проектуванні малих CAES, ємності під тиском, такі як сталеві резервуари високого тиску та сталі для трубопроводів використовується для зберігання повітря під високим тиском, що може зменшити його залежність від географічних умов [34, 35]. Хоча, бак високого тиску в ринок досяг допустимого стандарту тиску, його висока вартість будівництва ускладнює його застосування у великомасштабній системі CAES.

На щастя, ми можемо зберігати повітря в трубопровідній сталі, яка зазвичай використовується для транспортування природного газу. Трубопровідна сталь відноситься до гарячекатаного рулонного листа або важкої плити для великих розмірів діаметр зварних труб, що використовуються при транспортуванні нафти і газу [36]. З 1960-х років, з постійним оновленням, трубопровідна сталь була застосована в трубопроводах великої відстані роєкт трансмісії по всьому світу, серед яких закладений X80

Трубопровідна сталь досягла понад 4300 км, і її технологія дуже відпрацьована [37, 38]. Трубопровідна сталь технологія також була

реалізована в деяких основних таких проєктів, як проєкт доставки газу Захід–Схід у Китай.

У порівнянні з конструюванням повітря під високим тиском резервуар для зберігання, трубопровід сталевий метод може значно зменшити вартість системи, що має велике значення для навіть комерційне використання техніки CAES на сайті без каверни. Робочий тиск CSHC-100 системи NSF-CAES становить 8 МПа. Ця система перевірила технічне обґрунтування повітряного сховища на основі трубопровідної сталі техніка.

Щодо форм повітряного зберігання, способу зберігання повітря високого тиску безпосередньо використовується в обох традиційних CAES і AA-CAES. Однак цей метод обмежений через до низької ємності зберігання повітря. Система LAES використовує вологе повітря як середовище зберігання, що значно збільшує ємність накопичення енергії та зменшення простору для зберігання повітря і вартість зберігання. Тому техніка LAES має свій потенціал масового просування та застосування.

2.3.3 Підсистема регенерації тепла

Для підвищення ефективності виробництва електроенергії, SF-CAES використовує викопне паливо для нагріву повітря на вході в турбіну. Ця система має добру технічну зрілість, і це так доступні для використання поточні зрілі технологічні продукти.

Вихідна енергія системи може бути втричі від використання газу турбіна окремо, якщо процес переробки відходів терм хвостового повітря утилізується [4, 30, 39]. Однак SF-CAES має сильну залежність від палива та проблеми із забрудненням навколишнього середовища, що суперечить вимогам низького вмісту вуглецю.

Технологія регенерації тепла, одна з найважливіших і ключових технологій NSF-CAES, використовуються для вирішення вище обмежень SF-

CAES. Технологія регенерації тепла відноситься до техніки зберігання тепла стиснення і використання його для нагріву повітря, що надходить до кожного ступеня турбіни.

Цю технологію можна розділити на одноступеневу та багатоступеневу регенерацію тепла на основі адіабатичного стиснення на підходах до регенерації тепла. Порівняно з одноступінчастою, багатоступенева схема є більш зрілою, з якої співвідношення тиску кожного ступеня ближче до значення струму зрілий промисловий компресор. Кожен етап стиснення є подібно до адіабатичного стиснення, в результаті чого а більш ефективне стиснення.

Джерело теплової енергії та носій ТЕС є двома ключовим фактором підсистеми регенерації тепла.

Техніка регенерації має великий вплив на ефективність усієї системи CAES. Чим вища температура носія системи регенерації тепла, тим ефективність системи буде вищою. Таким чином, важливо виберіть відповідний носій ТЕС. Більшість встановлених CAES системи використовують оборотну воду як накопичувач тепла носій. Різні форми взаємодії повітря та води, включаючи розпилення, піноутворення та бульбашки, використовуються по-різному системи [40]. Наприклад, Sustain X Company використовує піниста форма, а LightSail Energy використовує розпилення форму.

Хоча циркуляційна вода дешева і проста отриманий діапазон температур малий, а має високу залежність від високотемпературного компресора, продуктивність також обмежена.

Реальним рішенням було б використання розплавленої солі або термального масла як термічного носія підсистема регенерації тепла. Розгортання двох резервуарів Схема також широко використовується в сонячній тепловій генерації системи [41]. Широке впровадження сольових

розплавів і термальне масло зобов'язане перевагою теплопередачі і продуктивність зберігання тепла [42–45]. Термоолія зазвичай використовується, коли температура нижче 400 С, і є розгортається за допомогою спеціальних пристроїв, включаючи клапан тиску, тоді як розплавлена сіль має більш високу робочу температуру діапазон, і його легко впровадити.

Система NSFCAES із 5-ступеневим стисненням і 3-ступінчастим розширенням показана на рис. 2.4. CSHC-100 використовує термальне масло як носій теплової енергії.

2.3.4 Підсистема турбогенерації

Підсистема турбогенерації є ключовим компонентом здійснення термоелектричного перетворення в процесі енергорозряду та ефективність цієї підсистеми визначає ефективність всієї системи CAES.

Враховуючи, що структура турбіни схожа на структуру газовий генератор, більшість поточних систем CAES використовують архітектуру багатоступінчастого розширення та повторного нагріву в середина. Micro CAES може використовувати компоненти турбіни мікрогазова турбіна, поршневий двигун розширення або повітряний двигун гвинтового типу. Однак задіяна технологія є ще не вдосконалена і все ще в періоді вдосконалення [46, 47].

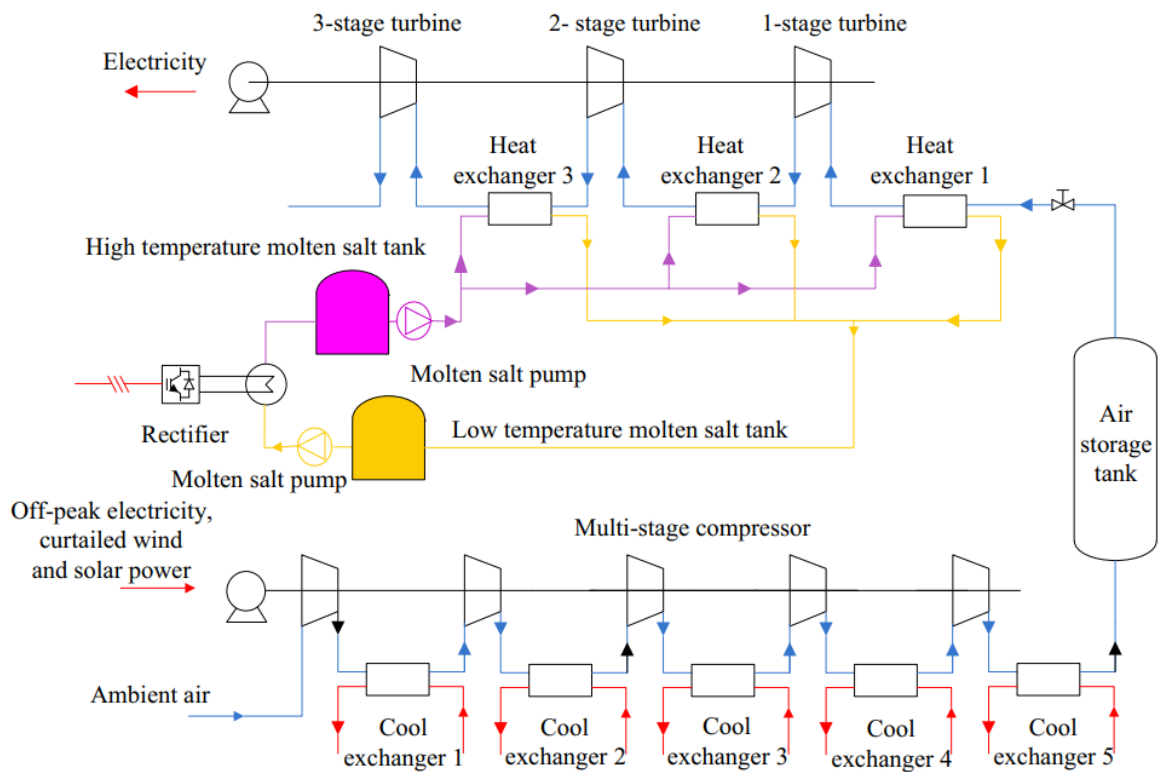


Рисунок 2.4 Технологічна схема системи NSF-CAES на основі розплавленої солі

Малі CAES мають відносно нижчу вихідну потужність, що призводить до меншого потоку повітря. Отже, робоче колесо є відносно менша і швидкість обертання турбіни вище. Тим часом розширення турбіни буде більшим через потребу збільшення ємності зберігання енергії на одиницю об'єму газосховища, що призвело до зниження в питоме ентальпійно-крапельне співвідношення повітря. В даному випадку лінійний швидкість колеса по колу робочого колеса зростає, що свідчить про збільшення частоти обертання турбіни. На основі за двома факторами, згаданими вище, швидкість обертання

турбіна в кіловат CAES може досягати рівня вище десятків тисячі. Отже, підсистема турбогенерації

Традиційний турбінний детандер необхідно оснастити швидкістю редуктори [48, 49]. Наприклад, TICC-500 використовує швидкість редуктор із співвідношенням 20:1 [12]. Потрібен швидкохідний редуктор бути

спроектованим через величезну різницю в швидкості обертання між турбінами і звичайними синхронними генераторами.

Однак він має обмеження щодо стабільності, терміну служби та втрати в процесі високошвидкісного обертання, вібрація і шум.

Крім того, його також потрібно налаштувати з комплексним маслом система живлення [50–52]. З розвитком технології високошвидкісних двигунів, використання генератора з високошвидкісним прямим приводом турбо еспандер стає новим напрямком розвитку. Через адаптацію високошвидкісного генераторного рішення, загалом система має переваги в обсязі, вазі, вартості будівництва, та ефективність роботи. Він більше підходить для задоволення потреб робота зі змінними параметрами процесу розширення турбіни [51–53]. Однак розвиток конструкції швидкісний двигун, аналіз динаміки ротора, технологія газових підшипників та відповідні силові електронні пристрої все ще знаходяться в початковому стані етап. Потрібне глибоке дослідження. CSHC-100 NSF-CAES використовує високу швидкість

двигун. Система використовує внутрішній ротор з постійним магнітом структура для ефективного вирішення питань магнітного мосту нести відцентрову силу та зменшувати обертальний момент. Крім того, для швидкого розподілу тепла, що виділяється вихрові струми, ротор може бути покритий поверхневим шаром тепловиділяючого матеріалу і теплоти, що виділяється при випромінюванні інфрачервоне, тепло ротора передається статору вакуумне середовище корпусу. В даний час проводяться дослідження силового електронного перетворювача для регулювання вихідної напруги високошвидкісного двигуна і відповідна технологія управління більш зріла, тому невелика технологія CAES на основі високошвидкісного двигуна дуже привабливий.

2.4 Перспективи застосування CAES

У розумній мережі є багато проблем, наприклад збільшення розриву пікового і западинного навантаження, збільшення невизначеність джерел і навантажень і множинність енергії потреби операторів перетворення в енергетичний Інтернет. У цих сценарії застосування, NSF-CAES має багато переваг, такі як можливості просторової та часової влади перемикавання, холод-тепло-енергія три покоління, нульовий вуглець емісія, висока ефективність, готові технології, зручне виготовлення обладнання, короткий термін будівництва та низький інвестиційний ризик.

Таким чином, NSF-CAES безсумнівно судилося створити велику цінність у побудові розумної мережі та енергетичного Інтернету.

2.4.1 Підвищення гнучкості інтелектуальної мережі

1) Зміщення силового навантаження. Нове покоління централізованої установки NSF-CAES має потужністю більше 50 МВт, і здатний постачати потужності до кількох годин, що на 1–2 порядки вище, ніж у звичайного акумулятора. Будівництво великомасштабної централізованої електростанції NSFCAES в районі видобутих соляних печер може сприяти економічній експлуатації енергосистем шляхом споживання надлишку електроенергії в позапіковий період та постачання електроенергії в години пік для переміщення енергетичного навантаження [54].

Малі децентралізовані NSF-CAES мають потужність до 1–50 МВт, що має високу гнучкість. Його можна використовувати для перенесення навантаження розподільної мережі та мікромережі.

Непікова потужність може використовуватися для зарядки та забезпечення пікового навантаження для досягнення економічної роботи мікромережі та мережа розподілу електроенергії.

2) Споживання відновлюваної енергії. Зайве говорити, як споживати відновлювану енергію за умови безпечної та надійної експлуатації система живлення є серйозною проблемою.

Можна використовувати розподілений NSF-CAES з потужністю мегават, в поєднанні з фотоелектричними електростанціями, такі як CSHC-100, вітрові електростанції, гідроелектростанції та інші опорні конструкції, для будівництва вітроелектростанцій та

Гібридна система CAES [58]. Реалізується за допомогою вітру, сонця, управління самостійністю гідроакумулюючих кооперативів [59], NSF-CAES може значно зменшити поточний вітер, явище скорочення сонячної та водної енергії [60].

Зокрема, може бути розподілена система NSF-CAES впроваджено в незалежну енергосистему в пустелі, гори, острови та інші віддалені місця або суворі середовища. Шляхом інтеграції NSF-CAES з вітром електроенергія, сонячна енергія, енергія припливів та інша чиста енергія джерел, очікується побудова низьковуглецевого комбінованого охолодження-опалення-енергопостачання незалежних систем живлення та стабілізації коливань фотоелектричних, вітрових потужностей і енергія припливів і стабільне забезпечення електроенергією надійно [61].

2.4.2 Побудова енергетичного інтернету

На основі енергетичного Інтернету або інтегрованої енергетики система, використання вітру, сонця, води, природного газу, та інші чисті джерела енергії в інтегрованому вигляді консенсусу щодо вирішення глобальної енергетичної кризи та проблем забруднення навколишнього середовища. Енергетичний інтернет-хаб діє як інтерфейс між енергетичною мережею, тепломережею та мережею газопроводу, і може бути реалізований для інтегрованої оптимізації та контролю між мультиенергетичні мережі [62, 63]. Потрібен енергетичний хаб здатність до перетворення, зберігання та

передачі енергії [62, 63]. Крім того, очікується, що центр чистої енергії не вироблятиме викидів вуглецю під час експлуатації NSF-CAES використовує рециркуляцію стисненої теплової енергії система для заміни підсистеми додаткового спалювання палива в SF-CAES. Розв'язування зберігання молекулярних потенціальної енергії повітря високого тиску і теплової енергії і можливість спільного постачання комбінованої електроенергії охолодження та опалення роблять її дуже привабливою чистою енергією концентратор [64]. Концентрований NSF-CAES можна використовувати для побудови енергетичного інтернету та реалізувати з різноманітних джерел енергії. З іншого боку, розподілені дрібномасштабні NSF-CAES можуть збирати електроенергію, газ, тепло та інші ресурси разом для будівництва мікроенергетичний Інтернет у міських та сільських громадах, індустріальний парк, заводи, школи та інші місця.

Завдяки перетворенню між кількома носіями реалізується інтегрована диспетчеризація всієї енергії та скоординоване планування знизити вартість експлуатації системи

Центр чистої енергії на базі NSF-CAES зображено на рисунку 2.5.

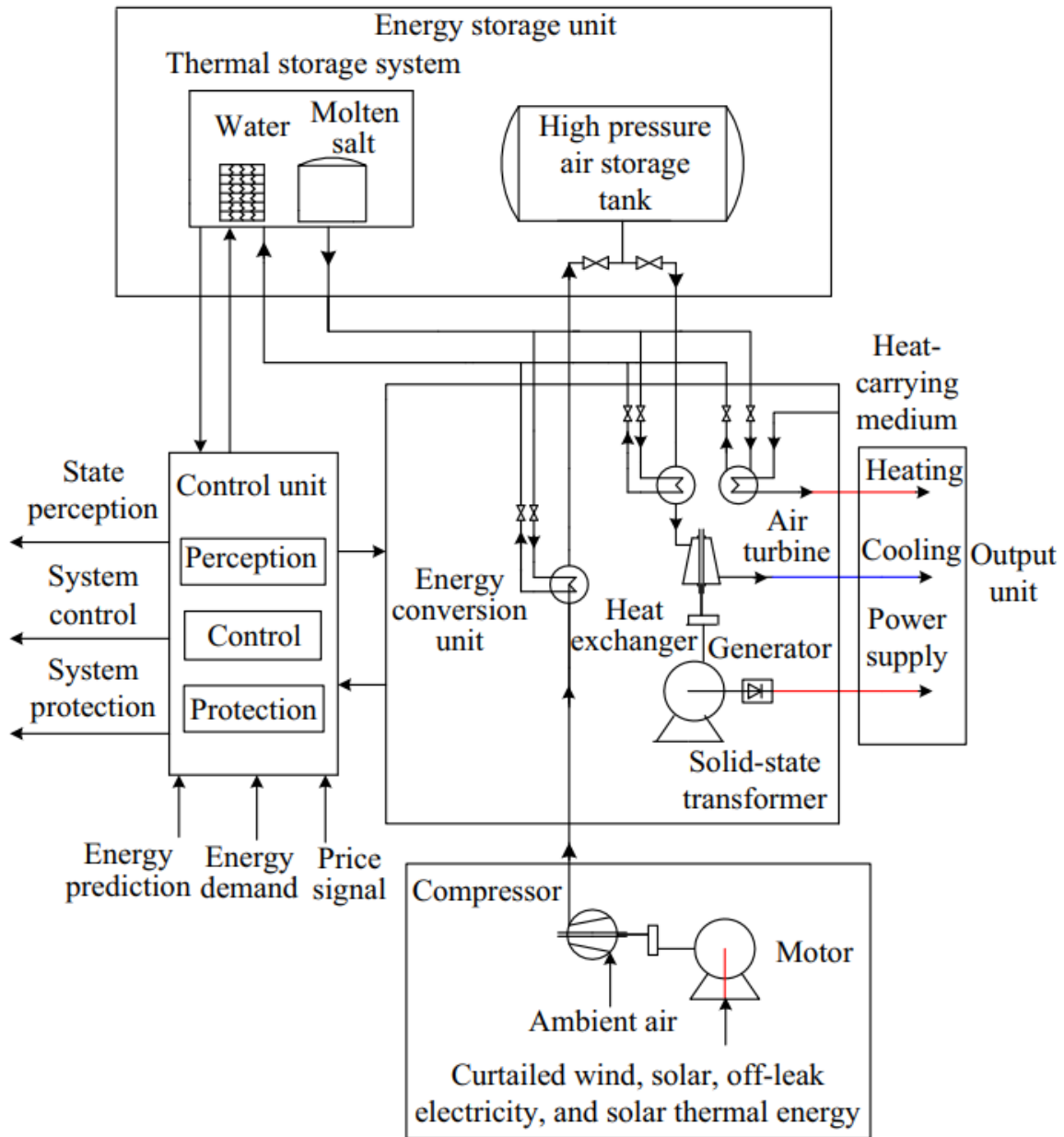


Рисунок 2.5 Архітектура центру чистої енергії на основі NSF-CAES

Концентратор в основному включає перетворення енергії, блок виведення енергії та управління. Детальніше про кожну одиницю можна знайти в [64].

2.5 Фактори, що стримують розвиток КАЕС

В даний час Китай є найбільшим у світі виробником електричної енергії з вітра та сонця. Проте прогрес будівництва сховищ відстає.

Технологія зберігання енергії та рівень розвитку став важливим показником для виміряти рівень розвитку відновлюваної енергетики країни енергетична промисловість. Як широкомасштабна технологія зберігання енергії, CAES має переваги великої ємності зберігання, довго термін експлуатації, незабруднення тощо, і він має широкий перспективи застосування. Але ефективність зберігання енергії, вартість системи та інші фактори загальмували подальший процес розвиток CAES. Розробка системи CAES з високою ефективність і низька вартість є актуальною проблемою, яку необхідно вирішити.

Водночас важливо створити та вдосконалити відповідний ринковий механізм зберігання енергії для здорових розвиток технології зберігання енергії.

2.5.1 Ефективність зберігання енергії

Система NSF-CAES, як правило, складається з підсистеми стиснення повітря, підсистеми зберігання повітря, підсистеми регенерації тепла та підсистеми генерації турбіни.

Ефективність зберігання системи тісно пов'язана з кожним підсистема. Таким чином, енергоефективність системи може бути покращеною за рахунок підвищення продуктивності будь-якої підсистеми.

1) Як основний засіб у процесі стиснення, компресор визначає ККД енергії процес зберігання. Відповідно до потреб майбутнього система CAES, технологія стиснення великого повітря потік, високий ККД і висока температура вихлопу буде розроблено. Підвищуючи температуру вихлопу компресора, температура зберігання тепла системи можна покращити, як і енергію ефективність зберігання системи.

2) Звичайні CAES можуть використовувати повітря як енергію носій інформації та потребують системи зберігання повітря з великою місткістю і

стійким високим тиском. Як технологія великомасштабного зберігання повітря, підземна сіль каверна відповідає вимогам CAES. Завдяки великій кількості повітря, що зберігається в соляній печері, тиск флуктуація камери зберігання газу невелика, яка значно покращує енергоефективність система.

Для електростанції ЦАЕС без наявності стан газосховища соляної каверни, газопровід транспортні технології можуть бути використані. Ця технологія може заощадити більше ніж на 50 % у порівнянні зі звичайним контейнером для зберігання газу під високим тиском, який може значно розширюють перспективи застосування CAES.

3) Параметри підсистеми регенерації тепла мають великий вплив на ефективність NSF-CAES система. Чим вища температура, тим буде вище ефективність ЕСС. Загальна енергія ефективність системи можна підвищити шляхом збільшення температура зберігання та ефективність тепла підсистема регенерації.

У районі з багатими сонячними ресурсами сонячна енергію можна використовувати як джерело тепла підсистема регенерації. Основна ідея заснована на кориті колекторна і високотемпературна техніка зберігання тепла, використання сонячної енергії для підвищення температури повітря на вході в турбіну, щоб підвищити ефективність роботи системи енергетична ефективність зберігання енергії.

4) Система турбіни є основним компонентом для термоелектричного перетворення в процесі розряду енергії. Його ефективність безпосередньо визначає загальну ефективність ЕСС. Наразі спеціалізованих немає великомасштабна повітряна турбіна. Тому, згідно з тепловою характеристикою повітря, розвиток і ефективна повітряна турбіна є ключем до покращення ефективність системи розширення електроенергії.

5) Розгляд системного циклу, покращення терм процесу та дослідження системи нового покоління важливі способи підвищення ефективності

зберігання система. Особливо для LAES це ключ до забезпечення ефективності зберігання енергії системи, що є більш ефективним зрідженням і холодним зберіганням процес.

2.5.2 Вартість будівництва

Ключем до економії витрат на CAES є зменшення вартості кожна підсистема, особливо система ТЕС і газосховищ система.

1) Щоб зменшити вартість будівництва системи, тепло зберігання та холодне зберігання стануть важливими аспекти дослідження. Низька вартість зберігання тепла/холоду Бажана робоча рідина для зберігання. Для високотемпературної системи ТЕС технологія зберігання тепла і світла слід посилатися. Зріла технологія зберігання використовується для зниження вартості системи.

2) Слід розробити недорогу технологію зберігання. Використання підземних соляних печер і спец геологічні умови печери, шахта корисна в зниження вартості будівництва. Як зріла технологія сховища великої ємності, сховища газу в соляних печерах успішно експлуатується в сховищах природного газу. Тиск і масштаб зберігання відповідають вимогам CAES, а також його вартість значно нижче штучного тиску.

3) Для малих CAES передові електричні та електронні технології використовуються для виконання прямого підключення високошвидкісної турбіни до генератора, видалення механічного редуктора спрощують структуру і систему та підвищують надійність системи. Використовуючи передові технології силової електроніки, це також допомагає знизити вартість будівництва CAES.

2.5.3 Ринковий механізм

Сталий розвиток техніки зберігання енергії невіддільний від ефективного ринкового механізму.

Розробка та застосування системи CAES в смарт мережах та енергетичний Інтернет потребують більшої підтримки, стимулювання, політика, правила та ринкова торгівля механізм.

Належні механізми та політика ціноутворення для зберігання енергії є важливими факторами підтримки сталого розвитку систем зберігання електроенергії для збільшення годин і скорочення викидів вуглецю та інших потенційних викидів.

Слід розглянути, щоб покращити ціноутворення на енергію механізм і керівництво індустрією зберігання та стабільний розвиток.

З удосконаленням політики регулювання і ринку стимулів, нове покоління системи CAES, яка є перевагою є його велика місткість, висока ефективність і чистота, відіграватиме дедалі важливішу роль у майбутньому енергетичні системи.

Висновки за другим розділом

CAES є перспективною технікою зберігання енергії великий потенціал для розвитку. Обличчям до енергії майбутнього галузі ця стаття присвячена основним принципам, характеристики ключових підсистем, а також застосування технології CAES. Тим часом можливі рішення для перспективи застосування та напрямки розвитку.

Пропонується технологія CAES для просування енергії Інтернет-будівництва, енергозбереження та емісії скорочення, ми можемо використовувати великі науково-технічні проекти як носій, прагнучі до співпраці між державними установами, промисловістю і науковими спільнотами, а також дослідження інститутів, виходити з різного мислення масштабних і дрібномасштабні CAES, таким чином значно використовуючи вирішальне значення розвитку індустрії CAES.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ПНЕВМО-ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

Розробка принципової та технологічної схеми фотоелектричної станції з пневмо-гравітаційним накопичувачем енергії у даній роботі проведена у вигляді розробки корисної моделі

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

Відомі фотоелектричні станції, які мають функцію накопичення виробленої енергії яка реалізована на базі хімічних акумуляторів різних типів та конструкцій. 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.

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.

Дана корисна модель покликана вирішити наступні технічні задачі:

- оптимізувати режим використання об'єму і маси основних споруд комплексу фотоелектричної станції з пневмо-гравітаційним накопичувачем енергії;
- поліпшити прогностичні показники генерації електричної енергії комплексом фотоелектричної станції з накопичувачем енергії.

В основу корисної моделі поставлено задачу удосконалення конструкції комплексу фотоелектричної електростанції, яка має засоби накопичення виробленої електричної енергії.

Так як створення твердотільних гравітаційних накопичувачів енергії пов'язано з спорудженням опорних конструкцій які мають значні лінійні розміри та формуванням робочого середовища великої маси, то використання проміжного пневматичного накопичувального резервуару та використання маси самої фотоелектричної станції та усіх агрегатів пневмо-гравітаційного накопичувача енергії дозволить значно скоротити витрати на спорудження комплексу та зменшити його габарити.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням, де на фіг. 1 зображено конструкцію фотоелектричної станції з пневмо – гравітаційним накопичувачем енергії, а на фіг. 2 її узагальнену технологічну схему

Фотоелектрична станція містить фотоелектричні модулі 1, двигун постійного струму 2, компресор нагнітач повітря 3, повітряну турбіну високого тиску 4, синхронний генератор 5, електричну підстанцію 6, опорну платформу 7, еластичну ємність 8, блок систем управління процесом роботи елементів комплексу 9.

Елементи 1 – 6, 9 розташовані на опорній платформі 7, що дозволяє використовувати їх масу та масу самої платформи як робоче середовища твердотільного гравітаційного накопичувача енергії.

Фотоелектричні модулі генерують електричну енергію постійного струму, яка живить двигун постійного струму 2, двигун постійного струму обертає робочий орган компресора нагнітача повітря 3 який нагнітає повітря в еластичну ємність 8 та утворює в ній тиск у вигляді якого відбувається заощадження виробленої електричної енергії. Тиск еластичного резервуару підсилюється дією сили гравітації, що утворюється масою самої фотоелектричної станції та масивної опорної платформи 7. Під час видачі електричної енергії до споживача повітря під тиском обертає повітряну турбіну високого тиску та створює обертовий механічний момент на її валу до якого приєднаний своїм валом синхронний генератор який перетворює механічну енергію обертання на електричну енергію.

Застосування даної корисної моделі дозволяє підвищити прогностичні показники генерації електричної енергії фотоелектричними електростанціями та корисно використовувати масу їх основних споруд

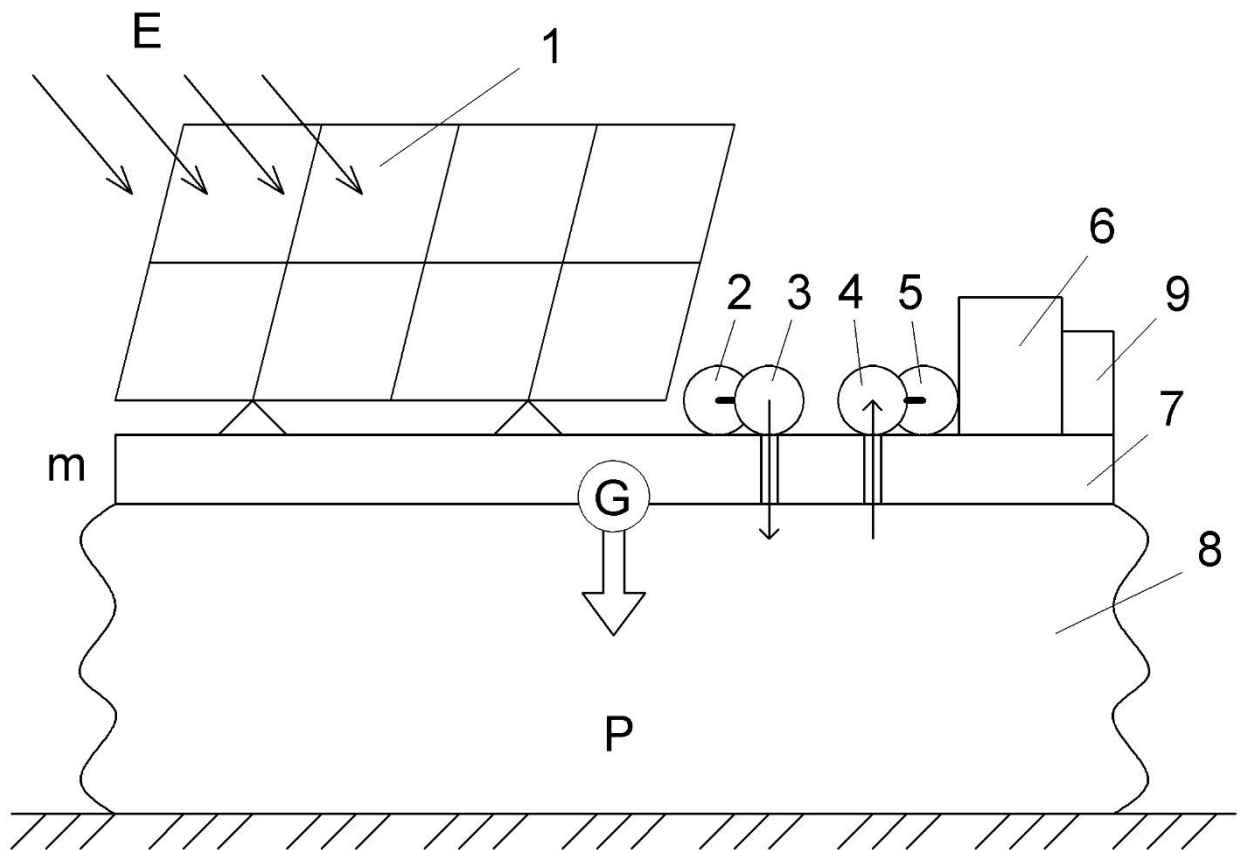


Рисунок 3.1 Технологічна схема комплексу фотоелектричної станції з пневмо-гравітаційним накопичувачем енергії

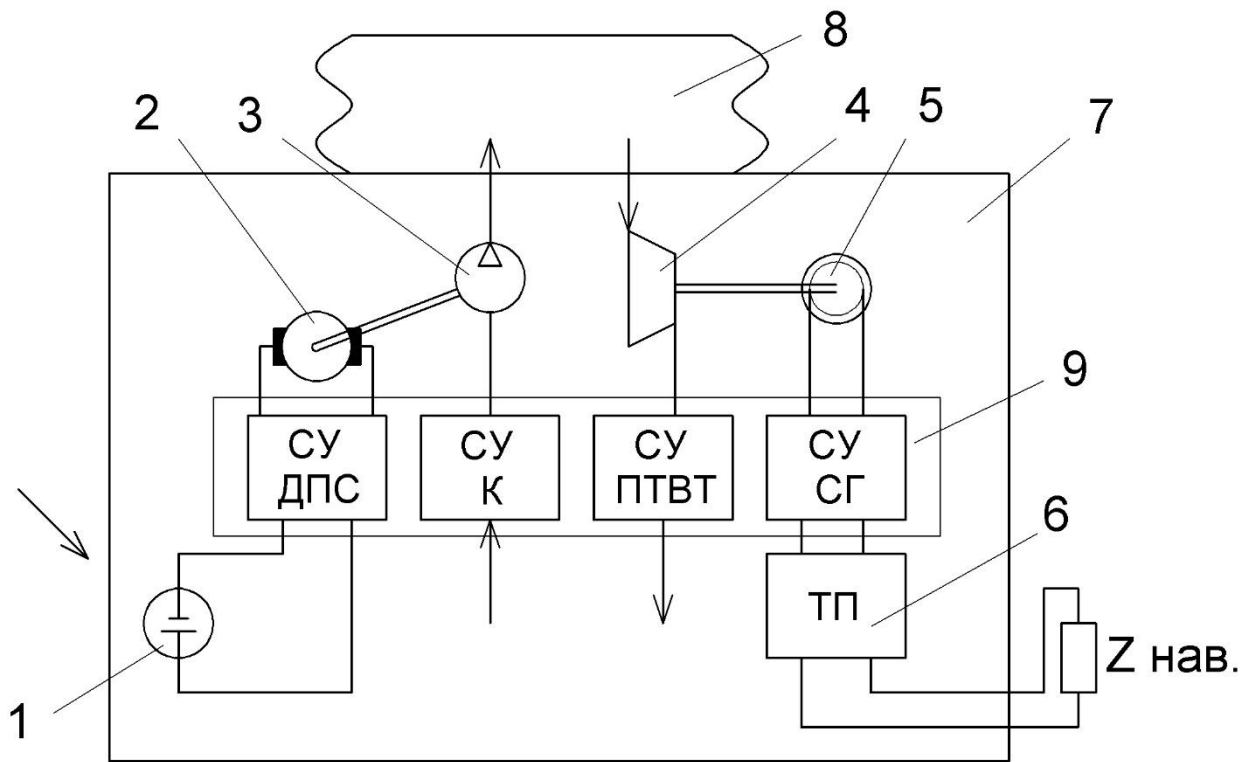


Рисунок 3.2 Принципова схема комплексу фотоелектричної станції з пневмогравітаційним накопичувачем енергії

Висновки за третім розділом

Проведено патентний пошук та знайдено максимально-наближений прототип

Розроблено загальну технологічну схему фотоелектричної електростанції з пневмо-гравітаційним накопичувачем енергії

Розроблено корисну модель пневмо-гравітаційного накопичувача енергії

ВИСНОВКИ

В роботі відповідно до завдань дослідження:

1. Проведено ґрунтовний критичний аналізу технологій накопичення енергії гравітаційними акумуляторами. Визначено перспективи розвитку твердотільних гравітаційних накопичувачів енергії у системах генерації електричної енергії засобами відновлюваної енергетики (зокрема фотоелектричними електростанціями)
2. Розроблено загальний принципів побудови комплексів фотоелектричних електростанцій з гравітаційними накопичувачами енергії.
3. Розроблено принципову та технологічну схеми пневмо - гравітаційного накопичувача енергії яка заснована на використанні ваги самої станції у якості робочого середовища твердотільного накопичувача енергії з проміжним накопичувачем енергії тиску повітря.
4. Визначено основні енергетичні співвідношення пневмо-гравітаційного накопичувача енергії

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rastler, D., Electricity energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs, and benefits. USA: Electric Power Research Institute (EPRI), Technical Update; 2010.
 2. Aneke, Mathew, and Meihong Wang. Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. Applied Energy 179 (2016):350-377.
 3. Information on <http://www.gravitypower.net>
 4. Aneke, Mathew, and Meihong Wang. Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. Applied Energy 179 (2016):350-377.
 5. Botha, Kamper. Capability study of dry gravity energy storage. Journal of Energy Storage, 23(2019), 159 -174
 6. Berrada, Loudiyi. Chapter 2-Technical Design of Gravity Energy Storage.Gravity Energy Storage. Elsevier. (2019) 25-49.
 7. Asmae Berrada, Khalid Loudiyi, Izeddine Zorkani, System Design and Economic Performance of Gravity Energy Storage, Journal of Cleaner Production ,156(2017)317-326.
 8. M.J.K. C.D. Botha, Capability study of dry gravity energy storage, Journal of Energy Storage 23 (2019) 159-174.
 9. Information on <http://www.gravitypower.net> [accessed on 8April 2022]
- Highlights in Science, Engineering and Technology MSMEE 2022
- Volume 3 (2022) 30
10. E. Heindl, Hydraulic Hydro Storage system for self-sufficient cities, Energy Procedia 46 (2014)98-103.
 11. Hearps, Patrick, et al. Opportunities for Pumped Hydro Energy Storage in Australia. (2014).

12. Pradhan, A., Marence, M., & Franca, M. J. The adoption of Seawater Pump Storage Hydropower Systems increases the share of renewable energy production in Small Island Developing States. *Renewable Energy*, 177(2021)448-460.
13. Moazzami, Majid, et al. Optimal economic operation of microgrids integrating wind farms and advanced rail energy storage system. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 8.2 (2018) 1155-1164.
14. Hunt, Julian David, et al. Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short-and long-term storage technologies. *Energy* 190 (2020) 116419.
15. Botha, Christoff D., and Maarten J. Kamper. Linear electric machine-based gravity energy storage for wind farm integration. 2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference. IEEE, 2020.
16. Slocum, Alexander H., et al. "Ocean renewable energy storage (ORES) system: Analysis of an undersea energy storage concept." *Proceedings of the IEEE* 101.4 (2013) 906-924.
17. Information on <https://energyvault.com/>
18. Morstyn, Thomas, Martin Chilcott, and Malcolm D. McCulloch. "Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts." *Applied Energy* 239 (2019)201-206.
19. Tan ZF, Ngan HW, Wu Y et al (2013) Potential and policy issues for sustainable development of wind power in China. *J Mod Power Syst Clean Energy* 1(3):204–215. doi:10.1007/ s40565-013-0037-8
20. Xie L, Carvalho PM, Ferreira LAFM et al (2011) Wind integration in power systems: operational challenges and possible solutions. *Proc IEEE* 99(1):214–232
21. Beaudin M, Zareipour H, Schellenberglabe A et al (2010) Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: an updated review. *Energy Sustain Dev* 14(4):302–314

22. Chen HS, Cong TN, Yang W et al (2009) Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Prog Nat Sci* 19(3):291–312
23. Inage S (2009) Prospects for large-scale energy storage in decarbonised power grids. International Energy Agency (IEA), Paris
24. Wang CS, Wu Z, Yang XS et al (2014) Modeling and verification of hybrid energy storage system based on micro compressed air energy storage. *Autom Electr Power Syst* 38(23):22–26. doi:10.7500/AEPS20131104010
25. Lemofouet S, Rufer A (2006) Hybrid energy storage systems based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking. *IEEE Trans Ind Electron* 53(4):1105–1115
26. Wang C, Chen LJ, Liu F et al (2014) Thermal-wind-storage joint operation of power system considering pumped storage and distributed compressed air energy storage. In: Proceedings of the 2004 power systems computation conference (PSCC'14), Wroclaw, Poland, 8–22 August 2014, 7 pp
27. Di'az-Gonza'lez F, Sumper A, Gomis-Bellmunt O et al (2012) A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renew Sustain Energy Rev* 16(4):2154–2171
28. Chai L (2014) Research progress of cold storage and thermal storage device for supercritical air energy storage system. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing. http://www.etp.ac.cn/xwdt/kydt/201403/t20140307_4047538.html. Accessed 6 Sep 2016
29. Hu S (2016) 863 “supercritical compressed air energy storage system research, development and demonstration” subject through technical acceptance. ESCN, Beijing. <http://www.escn.com.cn/news/show-324452.html>. Accessed 6 Sep 2016
30. Mei SW, Wang JJ, Tian F et al (2015) Design and engineering implementation of non-supplementary fired compressed air energy storage system: TICC-500. *Sci China E* 58(4):600–611

31. Luo X, Wang JH, Dooner M et al (2014) Overview of current development in compressed air energy storage technology. *Energy Procedia* 62:603–611
32. Chen HS, Liu JC, Guo H et al (2013) Technical principle of compressed air energy storage system. *Energy Storage Sci Technol* 2(2):146–151
33. Crotogino F, Mohmeyer KU, Scharf R (2001) Huntorf CAES: more than 20 years of successful operation. In: Proceedings of the Solution Mining Research Institute (SMRI) spring meeting, Orlando, FL, USA, 15–18 April 2001, 8 pp
24. Succar S, Williams RH (2008) Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power. Princeton Environmental Institute, Princeton
35. Huntorf CAES Powerplant. http://enipedia.tudelft.nl/wiki/Huntorf_Caes_Powerplant. Accessed 12 June 2016
36. Schulte RH, Critelli N Jr, Holst K et al (2012) Lessons from Iowa: development of a 270 megawatt compressed air energy storage project in midwest independent system operator: a study for the DOE energy storage systems program. Sandia National Laboratories, Albuquerque
37. John F (2013) FirstEnergy postpones project to generate electricity with compressed air. http://www.cleveland.com/business/index.ssf/2013/07/firstenergy_postpones_project.html. Accessed 12 June 2016
38. Budt M, Wolf D, Span R et al (2016) A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments. *Appl Energy* 170:250–268
39. ADELE Isothermal CAES. http://enipedia.tudelft.nl/wiki/Adele_Isothermal_CAES. Accessed 6 Sep 2016
40. Highview Power Storage. <http://www.highview-power.com/tour/>. Accessed 12 June 2016
41. Lightsail Energy. <http://www.lightsail.com>. Accessed 12 June 2016

42. SustainX. <http://www.sustainx.com>. Accessed 12 June 2016 Review and prospect of compressed air energy storage system 123
43. Supercritical compressed air energy storage system development. Chinese Academy of Sciences, Beijing. http://www.cas.cn/ky/kyjz/201307/t20130724_3904638.shtml. Accessed 6 Sep 2016
44. Wang SX, Zhang XL, Yang LW et al (2016) Experimental study of compressed air energy storage system with thermal energy storage. *Energy* 103:182–191
45. Liu B, Chen LJ, Mei SW et al (2014) The impact of key parameters on the cycle efficiency of multi-stage RCAES system. *J Mod Power Syst Clean Energy* 2(4):422–430. doi:10.1007/s40565-014-0090-y
46. Greenblatt JB, Succar S, Denkenberger DC et al (2007) Baseload wind energy: modeling the competition between gas turbines and compressed air energy storage for supplemental generation. *Energy Policy* 35(3):1474–1492
47. Kurz R, Brun K, Meher-Homji C et al (2012) Gas turbine performance and maintenance. In: Proceedings of the 41 turbomachinery symposium, Houston, TX, USA, 24–27 September 2012, 32 pp
48. Heavy duty gas turbine products (2009). GE Energy, Atlanta
- 48 Zhang XJ, Chen HS, Liu JC et al (2012) Research progress in compressed air energy storage system: a review. *Energy Storage Sci Technol* 1(1):26–40
49. Barnes FS, Levine JG (2001) Large energy storage systems handbook. CRC Press, Boca Raton
50. Oberhofer A, Meisen P (2012) Energy storage technologies and their role in renewable integration. Global Energy Network Institute (GENI), San Diego
51. Penberton D, Jewitt J, Pletka R (2008) Mini-compressed air energy storage for transmission congestion relief and wind shaping applications. New York State Energy Research and Development Authority, Albany

52. Bi JT, Jiang T, Chen WL et al (2013) Research on storage capacity of compressed air pumped hydro energy storage equipment. *Energy Power Eng* 5(4):26–30
53. Yin YQ, Lei XW, Wu KM (2012) Current status and prospectus of ultra-high strength pipeline steel development. *China Met* 22(9):5–9
54. Maes MA, Dann M, Salama MM (2008) Influence of grade on the reliability of corroding pipelines. *Reliab Eng Syst Saf* 93(3):447–455
55. Zhang CG, Zheng L, Xie SQ et al (2014) Recent developments of large diameter X80 UOE line pipes. *Baosteel Tech Res* 8(2):46–54
56. Eckroad S, Gyuk I (2003) EPRI-DOE handbook of energy storage for transmission and distribution applications. Electric Power Research Institute, Inc., Palo Alto
57. McBride T, Bell A, Kepshire D (2013) ICAES innovation: foam-based heat exchange. SustainX, Seabrook
58. Wu YT, Zhang LN, Ma CF (2007) High temperature thermal energy storage technology of solar thermal generation. *Sol Energy* 3:23–25
59. Agyenim F, Hewitt N, Eames P et al (2010) A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renew Sustain Energy Rev* 14(2):615–628
60. Ren T, Liu S, Yan GC et al (2016) Temperature prediction of the molten salt collector tube using BP neural network. *IET J Mag* 10(2):212–220
61. Li SD, Yan GF, Fu XD et al (2013) The state-of-art of thermal oil applied in mid-and high-temperature solar heat utilization system. *Mater Rev* 27(9):10–13
62. Kalogirou SA (2004) Solar thermal collectors and applications. *Prog Energy Combust Sci* 30(3):231–295

63. Review of electrical energy storage technologies and systems and of their potential for the UK (2004). EA Technology, Chester
64. Zuo CJ, Qian YJ, An D et al (2007) Experimental study on airpowered engine. *Chin J Mech Eng* 43(4):93–97
65. Kaplan U (2007) Organic rankine cycle configurations. In: Proceedings of the 2007 European geothermal congress, Unterhaching, Germany, 30 May–1 June 2007
66. Marcuccilli F, Zouaghi S (2007) Radial inflow turbines for Kalina and organic rankine cycles. In: Proceedings of the 2007 European geothermal congress, Unterhaching, Germany, 30 May–1 June 2007
67. Wang FX (2006) Study on design feature and related technology of high speed electrical machines. *J Shengyang Univ Technol* 28(3):258–264
68. Sun LJ, Ren XK, Gao YJ et al (2015) Study on feature and related technology of high speed turbine generator. *Cryog Supercond* 43(8):23–26
69. Wu Y, Zhang HT, Huang H et al (2014) Comparison and analysis of engineering application of two types of liquid turbine expander. *Cryog Technol* 5:23–25
70. Bianchi N, Bolognani S, Luise F (2004) Potentials and limits of high-speed PM motors. *IEEE Trans Ind Appl* 40(6):1570–1578
71. Salgi G, Lund H (2008) System behaviour of compressed-air energy-storage in Denmark with a high penetration of renewable energy sources. *Appl Energy* 85(4):182–189
71. Li JF, Cai FB, Qiao LM et al (2014) 2014 China wind power review and outlook. Chinese Renewable Energy Industries Association (CREIA), Beijing, China; Chinese Wind Energy Association (CWEA), Beijing, China; Global Wind Energy Council (GWEC), Brussels

72. Lund H, Salgi G (2009) The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems. *Energy Convers Manag* 50(5):1172–1179
73. Arabkoohsar A, Machado L, Koury RNN (2016) Operation analysis of a photovoltaic plant integrated with a compressed air energy storage system and a city gate station. *Energy* 98:78–91
74. Saadat M, Shirazi FA, Li PY (2014) Revenue maximization of electricity generation for a wind turbine integrated with a compressed air energy storage system. In: *Proceedings of the 2014 American control conference (ACC'14)*, Portland, OR, USA, 4–6 June 2014, pp 1560–1565
75. Lu Q, Sheng CY, Chen Y (2011) Coordinated autonomous control strategy for power systems with large-scale wind power plants. *Control Theory Appl* 28(10):1491–1495
76. Wan C, Zhao J, Song YH et al (2015) Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management. *CSEE J Power Energy Syst* 1(4):38–46
77. Cai GL, Chen RY, Chen JB (2012) Research on simulations and model of the isolated wind–solar–diesel–battery hybrid microgrid. In: *China international conference on electricity distribution (CICED)*, pp 1–4
78. Shabanpour-Haghighi A, Seifi AR (2015) Energy flow optimization in multicarrier systems. *IEEE Trans Ind Inform* 11(5):1067–1077
79. Geidl M, Andersson G (2007) Optimal power flow of multiple energy carriers. *IEEE Trans Power Syst* 22(1):145–155
80. Xue XD, Mei SW, Lin QY et al (2016) Energy internet oriented non-supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application. *Power Syst Technol* 40(1):164–171