

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

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ
МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-
2

спеціальності : 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____ / Олександр КАЛИТА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Ганна МОСІЄНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Олег ПОДОЛЯК
(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. КАРАЗІНА**

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 Олександр КАЛИТА

1. Тема «ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ
ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Рівень напруги, умови експлуатації,
характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат
дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
Вступ. Перелік умовних позначень. Проєктування цільового стану у сфері енергетичної безпеки. Формування множин параметрів опису системи енергетичної безпеки. Вплив моделі організації взаємовідносин між елементами системи енергозабезпечення. Контроль напруги та частоти збалансованої/незбалансованої системи розподілу за допомогою системи SMES за наявності енергії вітру. Висновки. Список посилань

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

6. Консультант:

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

7. Дата видачі завдання « 12 » _____ 10 _____ 2024 ____ р.**Керівник**

(підпис)

Ганна МОСІЄНКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання_____ Олександр КАЛИТА

(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 та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Олександр КАЛИТА

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота виконана на 68 стор., містить 4 таблиці, 23 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 56 літературних посилань.

Об'єкт дослідження – режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

Мета роботи – ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ.

Ступінь впровадження: проектні інститути.

Економічна ефективність значимість роботи: дана робота має високу значимість теоретичного й практичного рівня.

У цьому дослідженні проаналізовано метод FLC-SMES для покращення продуктивності збалансованої та незбалансованої системи розподілу, підключеної до SCIG на базі вітру. Запропонований спосіб успішно пом'якшував коливання напруги та частоти під час пориву вітру. Крім того, запропонований метод досягає вирівнювання потужності для мережі та загальних шин (18 і 33).

Крім того, для підтримки стабільності мережі було зменшено активну та реактивну потужності мережі. Система SMES має три режими роботи, де запропоноване керування може керувати SMES у режимі зарядки, режимі розрядки та режимі очікування відповідно до фактичної швидкості вітру та струму SMES.

Можливим подальшим розширенням цієї моделі є вивчення гібридних систем накопичення енергії з ВДЕ та включення електричних транспортних засобів для досягнення управління енергією систем електроенергії. Основними обмеженнями запропонованої роботи є висока капітальна вартість системи SMES і збереження надпровідного стану котушки SMES.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МІСЦЕ НЕСПРАВНОСТІ, ІНДИКАЦІЯ ПРОХОДЖЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ (FPI); ЗБАЛАНСОВАНА/НЕЗБАЛАНСОВАНА СИСТЕМА РОЗПОДІЛУ; НАДПРОВІДНИЙ НАКОПИЧУВАЧ МАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ (SMES); ЕНЕРГІЯ ВІТРУ; КОНТРОЛЕР НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ (FLC); КОНТРОЛЬ НАПРУГИ; РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ

ABSTRACT

The master's thesis is completed on 68 pages, contains 4 tables, 23 figures characterizing the results of the study, 56 literary references are used.

The object of the study is the operating modes of electric networks.

The subject of the study is electric networks.

The purpose of the work is STUDY OF THE STATE OF ENERGY SECURITY OF ELECTRICAL NETWORKS USING RENEWABLE ENERGY SOURCES.

The level of implementation: design institutes.

Economic efficiency significance of the work: this work has a high significance of the theoretical and practical level.

This study analyzes the FLC-SMES method to improve the performance of balanced and unbalanced distribution system connected to wind-based SCIG. The proposed method successfully mitigated the voltage and frequency fluctuations during wind gust. In addition, the proposed method achieves power equalization for the grid and common buses (18 and 33).

In addition, the active and reactive power of the grid were reduced to maintain grid stability. The SMES system has three operating modes, where the proposed control can control the SMES in charging mode, discharging mode, and standby mode according to the actual wind speed and SMES current.

A possible further extension of this model is to study hybrid energy storage systems with RES and the inclusion of electric vehicles to achieve energy management of power systems. The main limitations of the proposed work are the high capital cost of the SMES system and the preservation of the superconducting state of the SMES coil.

KEYWORDS: FAULT LOCATION, FAULT PROGRESSION INDICATION (FPI); BALANCED/UNBALANCED DISTRIBUTION SYSTEM; SUPERCONDUCTIVE MAGNETIC ENERGY STORAGE (SMES); WIND ENERGY; FUZZY LOGIC CONTROLLER (FLC); VOLTAGE CONTROL; FREQUENCY REGULATION

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ПРОЄКТУВАННЯ ЦІЛЬОВОГО СТАНУ У СФЕРІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ	12
1.1. Формування множин параметрів опису системи енергетичної безпеки	14
1.2. Проєктування цільового стану у сфері енергетичної безпеки	19
1.2.1. Відповідність суб'єкта управління	19
1.2.2. Вибір стратегічних цілей та методів реалізації політики забезпечення енергетичної безпеки	21
1.2.3. Вплив моделі організації взаємовідносин між елементами системи енергозабезпечення	26
1.2.4. Модель енергетичних ринків	29
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	35
РОЗДІЛ 2. КОНТРОЛЬ НАПРУГИ ТА ЧАСТОТИ ЗБАЛАНСОВАНОЇ/НЕСБАЛАНСОВАНОЇ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ SMES ЗА НАЯВНОСТІ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ	37
2.1. Конфігурація системи	37
2.2. Модель вітрової системи	38
2.3. Запропонована методика управління МСП	40
2.4. Результати моделювання та їх обговорення	42
2.4.1. Збалансований корпус	43
2.4.2. Незбалансований корпус	51
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	60
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	61
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- FPI – індикатор проходження несправності
- FL – центральний локатор несправності
- ПС – підстанція
- ВДЕ – відновлювані джерела енергії
- FACTS – системи передачі змінного струму
- ESS – системи накопичення енергії
- SMES – надпровідний накопичувач магнітної енергії
- DG – генератори розподілу
- ICI – навмисне кероване виділення
- ELC – електронний контролер навантаження
- OLTC – перемикач РПН
- ПІ – пропорційно-інтегральний контролер
- VSC – перетворювача джерела напруги
- ОРЕ – оптовий ринок електричної енергії
- НКРЕКП – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг
- РДД – ринок двосторонніх договорів
- РДН – ринок на добу наперед
- ВДР – внутрішньодобовий ринок
- БР – балансуючий ринок
- РДП – ринок допоміжних послуг
- ГП – гарантований покупець електричної енергії
- ОСП – оператор системи передачі
- ОСР оператор системи розподілу

ВСТУП

Завдяки значним перевагам, таким як зменшення споживання викопного палива та викидів CO_2 , забезпечення чистоти навколишнього середовища, збереження сільських територій, покриття попиту на навантаження та тривалий період експлуатації, відновлювані джерела енергії (ВДЕ) стали сприятливим вибором для виробляти електроенергію в багатьох країнах. Вітрогенератор вважається найдешевшим ВДЕ; таким чином, він використовується в більшості країн з різними технологіями. У багатьох країнах зросло поширення ВДЕ загалом і вітрових турбін зокрема. Відповідно до річного звіту [11], у 2019 році встановлена потужність ВДЕ зросла до понад 200 гігават, а світовий ринок вітроенергетики зріс на 19% у 2019 році до 60 ГВт [11]. Індукційний генератор з подвійним живленням (Тип 3) і вітряні турбіни з повним конвертором (Тип 4) вважаються найкращими типами вітрогенераторів. Однак індукційний генератор з короткозамкнутим ротором (SCIG, тип 1) все ще використовується на ринку [12], оскільки він має багато переваг, таких як низька вартість і висока надійність. Крім того, деякі компоненти, які вимагають постійного обслуговування, такі як щітки, збудник і контактні кільця, не є важливими для SCIG.

Як відомо, вітрові турбіни залежать від швидкості вітру як джерела генерації. Швидкість вітру непередбачувана, що призводить до переривчастого виробництва електроенергії від вітрової турбіни, що спричиняє коливання напруги та частоти. Стабільність напруги та частоти є найбільш серйозними проблемами, які виникають із симетричними та незбалансованими електричними мережами. Ступінь відхилення частоти показує ступінь стабільності системи; тим часом збереження напруги в допустимих межах забезпечує задовільну роботу приладу та побутової техніки.

Було запропоновано декілька методів вирішення проблем, пов'язаних із напругою та частотою, наприклад пристрої гнучкої системи передачі змінного струму (FACTS) [13, 14, 15, 16] і перемикач РПН (OLTC) [17]. Крім того, також використовуються адаптивна узгоджена схема керування напругою та

частотою [18], електронний контролер навантаження (ELC) [9] та навмисне кероване виділення (ICI) [20]. Посилання [21] показало, як оптимально розмістити генератори розподілу (DG) у радіальній розподільній мережі до та після реконфігурації. Крім того, розумний інвертор покращує індекс дисбалансу напруги та виявляє незбалансований стан величини та фази напруги [22] за допомогою систем накопичення енергії (ESS) [23, 24]. Стратегія керування напругою на основі чутливості розроблена для системи накопичення енергії в [25]. Для цієї мети використовуються ESS, до складу яких входить надпровідний накопичувач магнітної енергії (SMES) [26, 27], маховик [28, 29] або батареї [30]. Вони використовуються як життєво важливе рішення для підвищення стабільності напруги та частоти під час змін погоди. Щоб посилити коливання напруги та частоти під час поривів вітру як у збалансованих, так і в незбалансованих системах розподілу, час відгуку, ефективність і термін служби вважаються найважливішими факторами при виборі ESS. Сьогодні установка SMES вважається найкращим типом.

Блок SMES використовувався з фотоелектричною (PV) системою в присутності електричних транспортних засобів для покращення мережі живлення [31, 32], з вітром/PV [33], а також для покращення продуктивності зарядки/розрядки електричних транспортних засобів [34]. У [35] автор використовував блок SMES, заснований на підході адаптивного дробового порядку до ковзаючого режиму керування, щоб покращити його динамічні відповіді на різні робочі умови. Автори [36] представили керування багаторівневим перетворювачем джерела напруги, що покладається на SMES для ефективної підтримки активної та реактивної потужності електричної мережі, де блок SMES здатний миттєво контролювати електромеханічні коливання та допомагає в зменшенні відхилень частоти за межі. Підвищення стабільності напруги та частоти електричної мережі під час включення та відключення навантаження за постійної швидкості вітру за допомогою SMES з контролером нечіткої логіки (FLC) обговорюється на основі вітрового генератора на постійних магнітах (PMSG) у [37] та імітаційну модель

індукційного генератора з подвійним живленням (DFIG) у [38]. Дві різні архітектури силових кабелів високотемпературної надпровідності (HTS) досліджуються в умовах змінного струму в [39]. Прогностичне керування адаптивною моделлю використовується з SMES для пом'якшення різних проблем керування частотою навантаження в багатозональній енергосистемі [40]. Блок SMES був встановлений на вітрових електростанціях з дрібномасштабною зміною швидкості вітру для пом'якшення частотних коливань [41]. Його також використовували для регулювання енергії вітру при номінальній швидкості вітру [42]. Система SMES застосована до вітрової системи для стабілізації вітрогенератора в [43]. FLC-SMES було запропоновано для покращення перехідної стабільності в багатомашинній енергетичній системі [44]. У довідці [46] автори запропонували рішення для частих змін робочого струму, перехідних теплових характеристик і характеристик обміну потужністю SMES. Крім того, самоіндукція магніту та вплив критичного струму магніту під час різних робочих умов представлені в [45, 46, 47, 48, 49].

У цьому дослідженні пропонується метод керування на основі FLC-SMES для пом'якшення серйозних змін частоти, потужності та напруги, викликаних поривами вітру, з 30% проникненням загального навантаження, підключеного до системи збалансованого/незбалансованого розподілу шини IEEE 33 для керування активна та реактивна потужність, що вводиться в систему. SCIG обрано в цьому прикладі, тому що він представляє найгірший випадок вітрової системи за наявності поривів вітру як значну варіацію, що вказує на надійність запропонованого методу керування. SMES і вітрові турбіни підключаються до найслабших шин, тобто шин 18 і 33. Управління активною потужністю здійснюється DC-DC чоппером на основі управління FLC. Регулювання реактивної потужності виконує пропорційно-інтегральний (ПІ) контролер на основі перетворювача джерела напруги (VSC). SMES, вітрова турбіна, збалансована/незбалансована розподільна система IEEE 33, а також FLC і ПІ-контролер були змодельовані за допомогою програмного

забезпечення MATLAB. Результати моделювання доводять ефективність запропонованого методу керування з SMES для пом'якшення коливань напруги та частоти протягом тривалості поривів вітру в збалансованих і незбалансованих випадках.

Пропонується метод керування для пом'якшення коливань частоти та напруги в збалансованій/незбалансованій системі розподілу, пов'язаній із сильним проникненням енергії вітру під час поривів вітру.

- Це забезпечує стратегію вирівнювання потужності під час поривів вітру.
- Техніка FLC пропонується для DC-DC чоппера для визначення процесу заряджання/розряджання системи SMES.
- Розроблен двонаправлений VSC на основі PI-контролера для досягнення підтримки реактивної потужності основної мережі.
- Запропоновані рішення згладжують реальну вихідну потужність під час поривів вітру.

У зв'язку з цим метою цієї магістерської роботи є ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ.

Об'єкт дослідження – режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

Ключові слова: МІСЦЕ НЕСПРАВНОСТІ, ІНДИКАЦІЯ ПРОХОДЖЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ (FPI); ЗБАЛАНСОВАНА/НЕЗБАЛАНСОВАНА СИСТЕМА РОЗПОДІЛУ; НАДПРОВІДНИЙ НАКОПИЧУВАЧ МАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ (SMES); ЕНЕРГІЯ ВІТРУ; КОНТРОЛЕР НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ (FLC); КОНТРОЛЬ НАПРУГИ; РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ

РОЗДІЛ 1. ПРОЄКТУВАННЯ ЦІЛЬОВОГО СТАНУ У СФЕРІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Проектування цільового стану у сфері енергетичної безпеки є ключовим етапом формування ефективної системи, яка забезпечує стабільне функціонування енергетичного сектора в умовах сучасних викликів і загроз. Цей процес передбачає визначення бажаних параметрів, на основі яких система повинна функціонувати в майбутньому, і включає стратегічний, аналітичний і практичний аспекти.

Основні етапи проектування цільового стану

1. Визначення стратегічних цілей.

Формування цільового стану починається з визначення ключових цілей, які відповідають потребам держави, суспільства та окремих споживачів. До таких цілей можуть входити:

- Забезпечення енергетичної незалежності.
- Мінімізація ризиків, пов'язаних із зовнішніми загрозами.
- Перехід до сталого використання енергоресурсів.
- Зниження впливу енергетики на екологію.
- Створення інноваційної та адаптивної енергетичної системи.

2. Аналіз поточного стану.

Ефективне проектування вимагає глибокого розуміння поточного стану системи енергетичної безпеки, включаючи:

- Рівень забезпечення основними енергоресурсами.
- Стан інфраструктури.
- Економічні, технологічні та екологічні показники.
- Існуючі загрози та ризики.

Аналіз допомагає виявити сильні й слабкі сторони, що є основою для формування стратегічних орієнтирів.

3. Формування критеріїв цільового стану
Критерії повинні бути вимірюваними, реалістичними та відповідати сучасним викликам. Наприклад:

- Частка відновлюваних джерел енергії у загальному балансі енергоспоживання.
- Рівень залежності від імпорتنих енергоресурсів.
- Енергоефективність економіки.
- Інтеграція енергетичної системи до європейських і світових ринків.

4. Створення сценаріїв розвитку
Проектування цільового стану передбачає моделювання різних сценаріїв. Наприклад:

- Оптимістичний сценарій: активний розвиток технологій і стабільна геополітична ситуація.
 - Песимістичний сценарій: посилення енергетичних загроз, обмежені інвестиції.
 - Базовий сценарій: помірне зростання в умовах обмежених ресурсів.
- Ці сценарії допомагають оцінити ймовірність досягнення цільового стану за різних умов.

5. Розробка дорожньої карти
Дорожня карта включає перелік конкретних заходів, спрямованих на досягнення цільового стану. Наприклад:

- Впровадження енергоефективних технологій.
- Модернізація інфраструктури.
- Законодавчі реформи для стимулювання розвитку відновлюваної енергетики.
- Підвищення стійкості системи до зовнішніх загроз.

6. Моніторинг і коригування
Після визначення цільового стану необхідно створити систему моніторингу для

оцінки прогресу. Регулярне оновлення цілей і планів дозволяє враховувати зміни у внутрішньому та зовнішньому середовищі.

Принципи проєктування цільового стану

1. Комплексність. Цільовий стан повинен охоплювати всі аспекти енергетичної безпеки: від ресурсного забезпечення до екологічних стандартів.
2. Гнучкість і адаптивність. Умови у сфері енергетичної безпеки швидко змінюються, тому система повинна бути здатною оперативно адаптуватися до нових викликів.
3. Інноваційність. Урахування новітніх технологій, які можуть підвищити ефективність енергетичної системи.
4. Стійкість і безперервність. Система повинна забезпечувати стабільне функціонування навіть у разі виникнення кризових ситуацій.
5. Інтеграція. Врахування міжнародних зобов'язань, європейських стандартів та інтеграція національної енергосистеми до глобального енергетичного ринку.

Роль індикаторів у формуванні цільового стану.

Для оцінки досягнення цільового стану використовуються чітко визначені індикатори, які дозволяють кількісно оцінити прогрес. Наприклад:

- Зменшення споживання викопних видів палива.
- Зростання інвестицій у «зелену» енергетику.
- Підвищення частки населення, забезпеченого доступом до сучасних енергоресурсів.

1.1. Формування множин параметрів опису системи енергетичної безпеки

Розглядаючи систему забезпечення енергетичної безпеки як сукупність взаємопов'язаних елементів, що утворюють єдине ціле, важливо враховувати її багатогранність та взаємодію з навколишнім середовищем. Такий підхід

дозволяє глибше зрозуміти сутність системи, визначити її структуру, ресурси, функції та ключові процеси, що забезпечують ефективне функціонування. Аналіз системи з різних точок зору розкриває її специфіку та дозволяє формувати цілісне уявлення про її особливості.

Система енергетичної безпеки, як будь-яка система, характеризується кількома важливими аспектами:

1. Взаємодія із зовнішнім середовищем. Цей аспект охоплює місце системи в загальній структурі взаємозв'язків із іншими системами та її здатність адаптуватися до змін у зовнішньому середовищі. Зокрема, важливо розуміти, як зовнішні фактори, такі як економічні, політичні чи екологічні умови, впливають на систему енергетичної безпеки, і як система реагує на ці впливи.

2. Структура системи. Система складається з елементів і зв'язків між ними. Елементи можуть бути матеріальними (наприклад, обладнання, інфраструктура) або нематеріальними (правила, процедури, знання), і кожен з них відіграє свою унікальну роль у функціонуванні системи.

3. Ресурси системи. Це не лише фізичні енергетичні ресурси (ПЕР), такі як нафта, газ чи відновлювані джерела, але й технології, людський капітал, фінансові ресурси, знання та компетенції. Важливим є також забезпечення високої якості цих ресурсів для підвищення стійкості та ефективності системи.

4. Функції системи. Основні завдання системи забезпечення енергетичної безпеки полягають у створенні умов для стабільного постачання енергоресурсів, мінімізації ризиків і загроз у цій сфері, а також забезпеченні сталого розвитку енергетичного сектору.

5. Процеси. У системі відбуваються різноманітні процеси, спрямовані на досягнення її функцій. Це можуть бути процеси управління, планування, моніторингу, контролю, а також виробничі, сервісні й інформаційні процеси.

Коли система енергетичної безпеки розглядається як управлінська конструкція, вона стає своєрідним інструментом, що дозволяє об'єднати всі її аспекти в єдине ціле. Такий підхід сприяє формулюванню ключових питань для

розуміння поточного стану, визначення бажаних цілей і пошуку шляхів до їх досягнення. Відповіді на ці питання формуються через системний підхід, стратегічне планування та аналіз ризиків:

- Хто ми та де ми є? Це питання стосується визначення поточного стану системи, її можливостей і проблем. Воно базується на аналізі даних, що дозволяє оцінити, наскільки ефективно функціонує система на даний момент.
- Чого ми хочемо досягти? Це питання визначає бажаний стан системи, її стратегічні цілі. Стратегічне планування та цілепокладання є основними інструментами для формування відповідей.
- Як ми збираємося досягти цілей і що нам заважає? Відповідь на це питання потребує аналізу ризиків і загроз, розробки механізмів їх подолання, а також впровадження ризик-орієнтованого підходу до планування та управління.

Досягнення цілей потребує створення системи індикаторів, які дозволяють оцінювати прогрес. Індикатори можуть бути різними за своїм змістом і спрямованістю, але вони повинні охоплювати всі ключові аспекти системи. Зазначені індикатори можуть бути наскрізними, охоплювати різні особливості системи та враховувати декілька ризиків одночасно.

Виокремлюють шість основних категорій і близько 300 індикаторів, які дозволяють оцінити вплив різних факторів на стан системи. Цей підхід базується на прагненні охопити максимальну кількість чинників, зокрема:

1. Типи енергоресурсів: нафта, газ, вугілля, ядерна енергія, відновлювані джерела (сонячна, вітрова, біоенергетика, гідроенергетика), воднева енергетика, накопичувачі енергії.
2. Технології, що використовуються для видобування, транспортування та використання кожного типу енергоресурсів.
3. Групи споживачів: населення, ЖКГ, об'єкти соціальної інфраструктури (школи, лікарні), промисловість, транспорт, будівництво, державний сектор.
4. Інфраструктура та процеси:
 - Виробничі (видобуток, переробка, транспортування).

- Управлінські (цілепокладання, моніторинг, оцінка ефективності).
- Сервісні (навчання, обслуговування).
- Інформаційно-комунікаційні (звітність, формування громадської думки).

Запропонований підхід дозволяє інтегрувати різні аспекти енергетичної безпеки в загальну систему національної безпеки, враховуючи її значущість для стійкості суспільства та держави.

Проектування цільового стану у сфері енергетичної безпеки є багатограним процесом, який поєднує аналіз, планування та прогнозування. Воно дозволяє створити основу для довгострокового розвитку енергетичної системи, зменшити залежність від зовнішніх факторів і підвищити стійкість до загроз. Успішне виконання цього завдання сприяє зміцненню національної безпеки та сталому розвитку держави.

Зазвичай необхідно знайти баланс між спрощенням і деталізацією. Спрощений перелік індикаторів може призвести до ігнорування важливих аспектів, тоді як надмірна кількість індикаторів створює проблему «прокляття розмірності», що ускладнює їх використання і потребує обмеження їхньої кількості до оптимального рівня.

Основними критеріями для включення індикатора до остаточного переліку є:

1. Вплив на досягнення цільового стану – індикатор має бути ключовим для реалізації стратегічних цілей.
2. Інтегральна наскрізність – здатність індикатора прямо чи опосередковано впливати на широкий спектр показників, таких як ВВП чи енергоємність економіки.
3. Відповідність міжнародним стандартам – зокрема, критеріям Міжнародної енергетичної хартії (EIRA), що передбачають доступність, вимірюваність, порівнюваність, функціональність і об'єктивність даних.

Додатково застосовувалися групові індикатори, сформовані шляхом нормування (з урахуванням частки конкретного ПЕР у загальному енергетичному балансі) та інтегрального згортання.

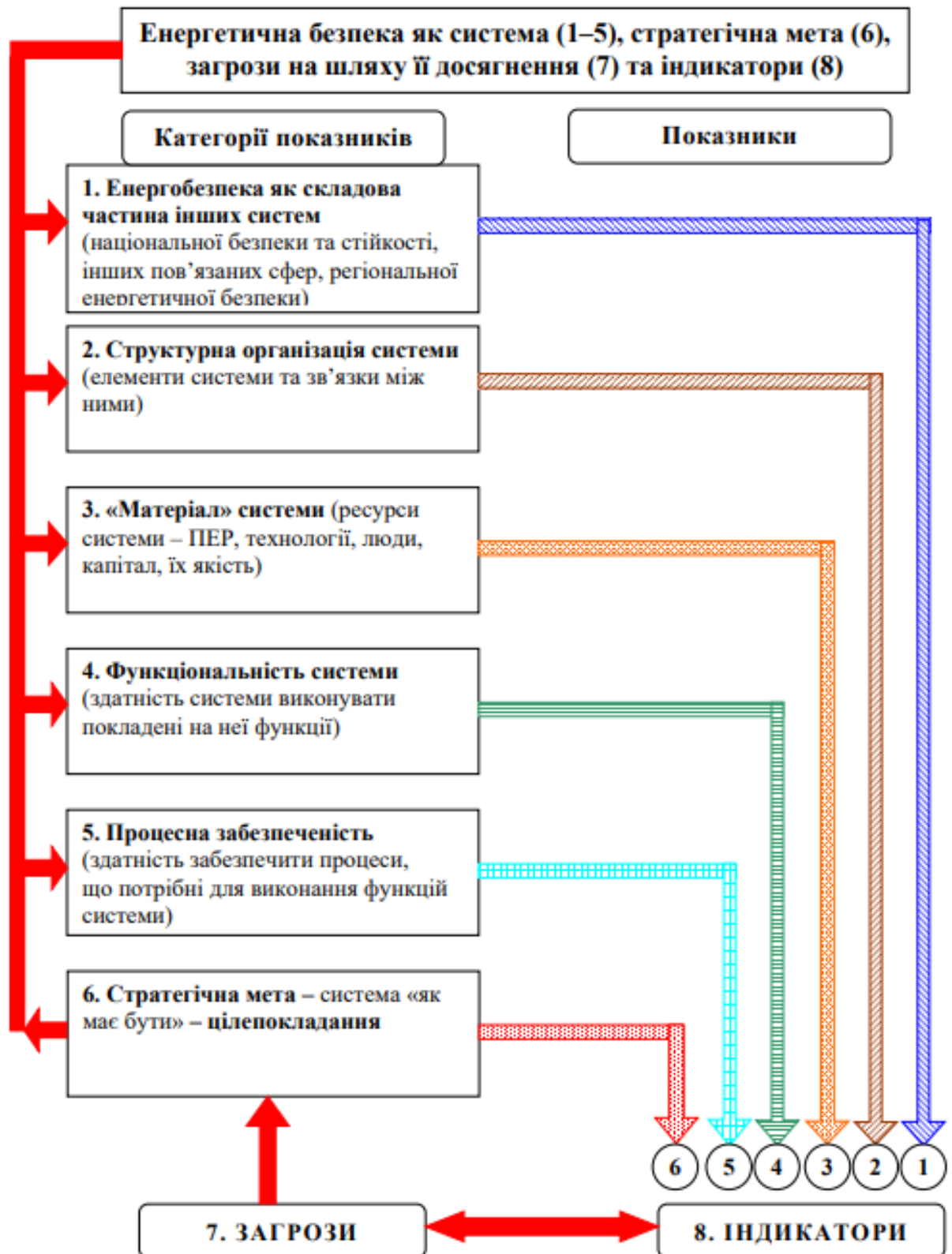


Рисунок 1.1 – Енергетична безпека як система (1–5), стратегічна мета (6), загрози на шляху її досягнення (7) та індикатори досягнення цілей (8)

Цей підхід до забезпечення енергетичної безпеки дозволяє поєднати на системному рівні ключові елементи:

- системний аналіз,
- стратегічне планування і цілепокладання,
- оцінку загроз і ризиків у контексті ризик-орієнтованого підходу.

Він також забезпечує можливість формування переліку індикаторів, які в достатній мірі відображають прогрес у досягненні стратегічних цілей та дозволяють ефективно оцінювати стан енергетичної безпеки.

1.2. Проектування цільового стану у сфері енергетичної безпеки

1.2.1. Відповідність суб'єкта управління

Визначення цілей діяльності у сфері енергетичної безпеки є складним і багатовимірним завданням. Воно не зводиться лише до екстраполяції поточних тенденцій розвитку енергетичного сектора або вибору параметрів, що описують стан енергетичної безпеки. Ускладнення виникає через необхідність формування прогнозів щодо майбутнього стану системи в умовах значної невизначеності, яка стосується як відомих параметрів, так і потенційно нових, ще невизначених, характеристик та їх бажаних значень.

До цієї задачі додається вплив світоглядних установок, які визначають цілі існування об'єкта управління і дії суб'єкта щодо нього. Важливо зазначити, що мова йде не лише про встановлення бажаних значень окремих параметрів, що може бути реалізовано за допомогою наявних інструментів, але й про необхідність аналізу суб'єктом своїх власних інтересів, цілей і можливих конфліктів чи узгоджень цих інтересів із потребами об'єкта управління.

У контексті державного управління це означає необхідність прийняття «політичних» рішень щодо стратегічних напрямків у сфері енергетичної безпеки. Наприклад, вибір між «адміністративною» чи «ринковою» моделлю управління, визначення оптимальної структури енергетичного балансу, або прийняття рішень щодо синхронізації енергосистеми України з енергетичними мережами країн ЄС чи СНД.

На жаль, в українському законодавстві практично відсутня нормативна база, яка б визначала підходи до формування цілей у цій сфері. Відсутність чіткої задачі «цілепокладання», тобто проблематики і методології визначення цілей діяльності суб'єкта управління, є серйозною прогалиною. Це також стосується практичної діяльності системи державного управління, де ця проблема майже не отримує належної уваги.

Відтак, для ефективного управління енергетичною безпекою необхідно не лише вдосконалювати законодавчу базу, а й впроваджувати системний підхід до визначення цілей, що враховує як інтереси суб'єкта, так і об'єкта управління, та враховує довгострокові перспективи й виклики.

Розглянемо чинники та «політичні» позиції, які враховуються під час визначення цільових параметрів оцінювання енергетичної безпеки. Зазначимо, що це не єдино можливий підхід до цілепокладання і не вичерпний перелік чинників, адже вони змінюються залежно від соціально-політичного та технологічного контексту. Проте цей аналіз підкреслює необхідність усвідомлення світоглядного позиціювання суб'єкта управління щодо його ролі та місця, а також місця і ролі об'єкта управління в «ширшій» системі.

Важливо наголосити, що здатність суб'єкта управління усвідомити своє позиціювання у системі, а також його спроможність розробляти стратегії, формувати програми та плани для переведення об'єкта управління з «поточного, небезпечного» стану до «майбутнього, безпечного» є показниками якості та ефективності цього суб'єкта. Якість суб'єкта управління, у свою чергу, є невіддільною складовою «якості матеріалу» системи забезпечення енергетичної безпеки.

Виходячи з цього, однією з ключових цілей у сфері енергетичної безпеки має стати створення механізмів, що унеможливляють доступ до стратегічних управлінських позицій осіб або інституцій із недостатнім рівнем компетенцій чи якостей, що можуть знизити ефективність управління. Такі механізми покликані гарантувати відповідність управлінських рішень довгостроковим інтересам системи енергетичної безпеки та забезпечити її стійкість в умовах зовнішніх і внутрішніх викликів.

1.2.2. Вибір стратегічних цілей та методів реалізації політики забезпечення енергетичної безпеки

Для забезпечення енергетичної безпеки країни суб'єктом управління виступає формалізована система органів державної влади, тоді як об'єктом є система, що забезпечує енергетичні потреби національної економіки, суспільства та держави. Головною метою управлінської діяльності суб'єкта є створення такої енергетичної системи, яка функціонує максимально ефективно, забезпечуючи мінімальний негативний вплив на суспільство та навколишнє середовище, враховуючи конкретні політичні, економічні, технологічні, кліматичні й соціальні умови відповідного історичного періоду.

Водночас суб'єкт управління формує свої цілі й інтереси, виходячи зі свого розуміння ролі та місця об'єкта управління в «ширшій» системі. Наприклад, країни-споживачі енергоресурсів та енергоємна промисловість прагнуть доступності цін на енергоресурси, стабільності постачань і їх диверсифікації. Натомість країни-виробники енергоресурсів зацікавлені в стабільних ринках збуту, гарантованих доходах від експорту та монополізації постачання.

Для країн із швидкими темпами економічного зростання головним пріоритетом стає мінімізація цінового навантаження на споживачів, що дозволяє підтримувати їхню купівельну спроможність та реалізовувати амбітні

плани соціально-економічного розвитку. Таким чином, інтереси суб'єкта управління суттєво залежать від його позиції в енергетичній системі та економічної моделі країни. Це вимагає врахування різноманітних факторів та інтересів при формуванні стратегій у сфері енергетичної безпеки.

З точки зору формування державної політики, різноманітність позицій суб'єктів формує широкий спектр інтересів, цілей і методів забезпечення енергетичної безпеки в різних країнах. Водночас на глобальній арені чітко простежуються відмінності у підходах до розуміння об'єкта енергетичної безпеки та цілей, які переслідує суб'єкт управління цією сферою.

Аналізуючи зарубіжні публікації, можна виділити кілька ключових питань, які визначають зміст поняття «енергетична безпека» та формують відповідні цілі суб'єктів управління енергетикою:

- Рівень забезпеченості власними енергоресурсами. Йдеться про приналежність країни до категорії нетто-«виробників» або нетто-«споживачів» енергоресурсів, що значною мірою впливає на її енергетичну політику.
- Модель взаємовідносин між складовими системи енергозабезпечення. Це охоплює взаємодію між державою, виробниками/постачальниками та споживачами енергоресурсів, яка може базуватися на «ринкових» механізмах регулювання або на «адміністративних» підходах.
- Міжнародні амбіції та стратегія використання енергії. Сюди входять позиції країни на світових ринках, її прагнення впливати на них і підходи до розгляду енергії як «енергетичної зброї» або як звичайного «ринкового товару».

Ці аспекти не лише формують основи енергетичної політики кожної країни, але й визначають її роль у глобальній енергетичній системі.

Ці фактори суттєво впливають не лише на формальні цілі та завдання енергетичної політики країни та формування системи забезпечення енергетичної безпеки, але й визначають методологію та принципи управлінських дій. Це підтверджується різними пріоритетами енергетичної

політики у різних країнах, основних учасників світового енергетичного ринку, таких як Росія, США, ЄС та Китай (таблиця 1.1) [2].

Наприклад, Росія пріоритетно створює енергетичний сектор, який виконує роль певного «силового» чинника для досягнення зовнішньополітичних цілей, не обмежуючись просуванням інтересів лише енергетичного сектору. На енергетичний сектор також покладається завдання компенсувати недоліки соціально-економічної моделі країни, забезпечуючи бюджетні надходження від видобувної діяльності.

Таблиця 1.1 – Характеристика енергетичної політики різних суб'єктів світового енергетичного ринку

Х-ки	Суб'єкти світового енергетичного ринку			
	Росія	США	ЄС	Китай
Забезпеченість власними ресурсам	Повністю забезпечен а власними ресурсами. Енергетич ний сектор є пріоритетн ою галуззю економіки, контрольов аною державою, яка має наповнюва ти бюджет	Переважаю забезпечені власними ресурсами, потребують імпорту окремих видів (обсягів) ресурсів. Енергетичн ий сектор є сферою економіки, яка у конкурентн их умовах має забезпечити енергопоста чання потреб економіки та суспільства	Власних ресурсів недостатньо, нагально потребує зростання обсягів імпорту. Енергетичний сектор є сферою економіки, яка у конкурентних умовах має забезпечити енергопостачання потреб економіки та суспільства	Власних ресурсів недостатньо, нагально потребує зростання обсягів імпорту. Енергетичний сектор під контролем держави має забезпечити енергопостачан ня потреб економіки та суспільства
Організац	Енергетика	Переважна	Енергетика	Енергетика

ія взаємовід носин	частково приватизов ана із збереженн ям ролі великих державних компаній. Енергетич ні ринки частково лібералізов ані, але із збереженн ям визначальн ої ролі держави, регулюван ня монополій, цінового регулюван ня	форма власності в енергетиці – приватна, працює у конкурентн ому середовищі. Енергетичні ринки конкурентні , регулюютьс я переважно з точки зору обмеження монополізм у та зловживань на фінансових ринках	переважно приватизована, здійснюється поглиблення конкуренції через розділення компаній за видами діяльності. Енергетичні ринки конкурентні, з істотним впливом регуляторів, переважно з точки зору обмеження монополізму та зловживань на фінансових ринках	переважно державна. Підтримуються приватні інвестиції у нові галузі й технології. Енергетичні ринки регулюються державою; проголошено плани щодо поступової лібералізації ринків
Амбіції на світових ринках	Посилення позицій у світовій економічній системі через використан ня енергетики для досягнення як економічн их, так і політичних цілей. Розвиток контрольов аної інфраструк	Сприяння американсь ким компаніям у проектах в різних країнах світу для гарантуванн я збільшення контрольова них постачань на глобальні ринки. Вплив через формування правил	Захист власного ринку від монополізму виробниківпостач альників, підтримка розширення диверсифікації та захисту поставок ресурсів. Поширення правил європейських ринків на країни, що постачають та/або транзитують ресурси у Європу Вільний доступ іноземних	Державна підтримка укладання китайськими компаніями двосторонніх довгострокових контрактів із країнами вироб никами. Пріоритет двостороннього співробітництв а між виробниками та споживачами енергоресурсів. Доступ іноземних інвестицій на

	тури, мережі компаній та/або формування правил гри для захисту своїх інтересів на світових ринках. Доступ іноземних інвестицій на внутрішній ринок можливий. У частині великих проєктів видобувної галузі (нафта та газ) необхідне погодження держави та збереження контролю над спільними підприємствами	функціонування глобальних ринків та правил гри через міжнародні угоди. Вільний доступ іноземних інвесторів на внутрішній ринок. Формування єдиного глобального ринку енергоресурсів	інвесторів на внутрішній ринок за дотримання правил конкуренції на ринках та розділення видів діяльності	внутрішній ринок можливий за збереження контролю над спільними підприємствами у китайських партнерів
--	---	---	--	--

Європейський Союз, формуючи конкурентну модель організації суспільства, ставить за пріоритет забезпечення енергетичної безпеки шляхом обмеження потенційного «силового» впливу постачальників енергоресурсів. Відповідно, завданнями ЄС є диверсифікація джерел і маршрутів постачання

енергоресурсів, а також посилення конкуренції на внутрішніх ринках і запобігання зловживанням з боку монополістів.

У свою чергу, для України, яка є імпортером енергоресурсів, її енергетична політика, цілі та методи їх реалізації не можуть бути ідентичними політикам країн-виробників енергоресурсів. Україна повинна забезпечити стабільний імпорт необхідних обсягів енергоресурсів зі світових ринків, що можливо тільки при виграші в ціновій конкуренції з іншими країнами-споживачами. Це, в свою чергу, можливо лише за умови високої конкурентоспроможності національної економіки на міжнародних ринках, де додана вартість української продукції служить основним ресурсом для закупівлі енергоресурсів.

Інтереси України та Європейського Союзу у сфері енергетичної безпеки є взаємодоповнювальними, що підтверджує правильність і стратегічність вибору євроінтеграційного шляху, зокрема в контексті впровадження ринкової моделі взаємовідносин на енергетичних ринках. Метою енергетичної політики України має бути створення такого стану енергетичної системи, який забезпечить здатність країни в умовах конкурентної боротьби залучати енергетичні ресурси та ефективно їх використовувати для задоволення потреб суспільства. Ключовим критерієм безпеки в енергетичній сфері буде мінімізація витрат суспільства на енергозабезпечення за різноманітних політичних, економічних, технологічних, кліматичних, соціальних і екологічних умов.

1.2.3. Вплив моделі організації взаємовідносин між елементами системи енергозабезпечення

Стратегічна важливість енергетики та взаємозв'язків на енергетичних ринках полягає не лише в обсягах залучених ресурсів, а й у впливі енергетики на економічну та політичну систему країни. У цьому контексті процес трансформації енергетичного сектора з централізованої галузі економіки, що

базується на державній власності, у ринкову модель з різними формами власності є яскравим прикладом не зовсім успішних рішень.

Невеликий прогрес у реформах не тільки уповільнює розвиток енергетичного сектора, але й вказує на існування середовища, яке підтримує саме таку модель організації суспільного життя та управління енергетичним сектором країни. «Коаліція владних груп», зайнявши управлінські позиції, прагне отримати ренту з об'єкта, підтримуючи існуючу інституційно-організаційну структуру та систему управління ним.

З моменту здобуття незалежності Україна успадкувала потужний енергетичний сектор, який управлявся централізовано, а також практику державного контролю в управлінні галуззю. Цей потужний комплекс став використовуватись як «витратний» ресурс для суб'єкта управління (домінантної коаліції). Україна фактично відкинула всі логічно можливі варіанти реформування енергетичного сектору, серед яких:

- приватизація енергетичної галузі та лібералізація ринку з переходом до ринкового ціноутворення для всіх категорій споживачів на внутрішньому ринку;
- відкриття ринків та залучення інвестицій, при цьому зберігаючи сильні державні енергетичні компанії;
- збереження централізованої системи управління та енергетичних активів під державним контролем.

На початку реформ 90-х років XX століття була обрана модель часткової приватизації енергетичних активів при збереженні моделі регульованого державою ринку енергії. З політичної точки зору це давало певні тимчасові переваги, оскільки обіцянки про субсидовані низькі ціни на енергоносії, відповідно до патерналістських очікувань населення, стали інструментом здобуття електоральної підтримки.

Запровадження специфічної моделі управління у трикутнику «держава – виробник енергії – споживач енергії», яка базується на збереженні субсидованих цін для споживачів, призвело до того, що держава взяла на себе

зобов'язання балансувати фінансовий стан державних енергетичних компаній, використовуючи різні інструменти, в тому числі безпосередні бюджетні витрати.

Застосування цієї моделі субсидованих цін спричинило такі наслідки:

- компенсація державою фінансових втрат енергетичних компаній (виробників) через існування регульованих цін;
- впровадження «витратної» методології тарифо- та ціноутворення (реальні витрати плюс регульована норма рентабельності) і механізмів контролю витрат енергетичних компаній;
- обмеження інвестиційних можливостей компаній через відсутність погодження інвестиційних програм, переважно через політичні мотиви, зокрема через недопущення підвищення цін.

Окрім безпосереднього впливу на стан енергетичного сектору, така модель взаємовідносин також створює низку побічних ефектів, які є несприятливими не лише для сталого розвитку енергетичного сектору, але й для економічного та соціального розвитку країни в цілому.

Після зміни моделей функціонування енергетичних ринків газу та електроенергії в період з 2015 по 2019 рр. описана раніше патерналістська модель була збережена через введення механізму покладання спеціальних обов'язків (PCO), що дозволило продовжити підтримку політично обумовлених низьких цін для окремих категорій споживачів.

Цей підхід до субсидування на практиці стимулює учасників ринку ігнорувати зниження втрат, що, у свою чергу, призводить до відсутності суттєвих змін у ефективності енергопостачання та енергоефективності економіки в цілому.

Очевидною є хибність такого принципу гарантування соціальної справедливості. Проте, зміни в напрямку впровадження прямих фінансових розрахунків між виробниками та споживачами енергоресурсів все ще не спостерігаються. Більше того, виступи політиків та урядовців свідчать про

пріоритет збереження низьких цін у поточній ситуації, а не про планування майбутнього енергетичного сектору.

Таким чином, головною моделлю взаємовідносин в енергетичній сфері в трикутнику "держава – виробник енергії – споживач енергії" повинно стати запровадження прямих договірних відносин між усіма суб'єктами ринку без участі держави у регулюванні фінансових потоків між ними. З точки зору стратегічного планування переходу до цього стану першочерговим завданням є реформування системи енергетичних субсидій. Система підтримки вразливих категорій споживачів має формуватися в рамках соціальної політики, а не в енергетичному секторі. Тобто, допомога малозабезпеченим споживачам повинна надаватися у вигляді прямих адресних грошових компенсацій у рамках соціальної політики, тоді як розрахунки між споживачем та постачальником енергії мають здійснюватися за ринковими правилами.

Введення прямих договірних відносин між споживачем та постачальником за умов ефективної антимонопольної політики створить механізм взаємоконтролю та стимулюватиме всіх учасників ринку до енергозбереження.

1.2.4. Модель енергетичних ринків

Вибір моделі функціонування енергетичного ринку здійснюється з урахуванням умов конкретної країни, враховуючи матеріальні (ресурсні та технологічні бази, географію виробництва та споживання), організаційно-функціональні аспекти (моделі управління, організацію суспільно-економічних відносин тощо) та цілі розвитку країни (пріоритети розвитку чи реформування внутрішніх ринкових відносин та місце країни у світовому розподілі праці). Серед основних моделей організації ринку електроенергії, в порядку їх лібералізації, виділяють такі:

- вертикально інтегрований ринок;

- модель єдиного покупця (модель пулу);
- модель з дерегульованою оптовою торгівлею;
- модель з нерегульованою оптовою і роздрібною торгівлею;
- ринок двосторонніх договорів та балансуючий ринок.

Кожна модель функціонування ринку має свої особливості з точки зору обліку виробленої та спожитої електроенергії, інституційно-організаційних елементів, їх функціонального призначення, механізмів управління, регулювання та контролю за дотриманням правил роботи ринку, механізмів розрахунків між суб'єктами ринку, реагування на нештатні ситуації та балансування інтересів.

Вертикально інтегрований ринок електроенергії функціонує на основі вертикально інтегрованих компаній, які безпосередньо виробляють, передають і постачають електричну енергію. У цій моделі споживачі не мають можливості вибрати оптових і роздрібних постачальників електроенергії, що часто призводить до зростання цін через монополізацію ринку, відсутність контролю з боку споживачів за ціноутворенням і непрозорість інформації.

Модель єдиного покупця (модель пулу) передбачає монополію в оптовій торгівлі електроенергією, але допускає (за певних умов) конкуренцію у виробництві і постачанні електроенергії кінцевим споживачам.

Модель з дерегульованою оптовою торгівлею електроенергією передбачає поступове зменшення участі єдиного оптового покупця на ринку електроенергії, дозволяючи дедалі більшій кількості енергопостачальних компаній та великих споживачів укладати прямі договори купівлі-продажу електроенергії безпосередньо з виробниками. Впровадження цієї моделі призводить до створення ринку тривалих прямих договорів купівлі-продажу електроенергії за ринковими цінами та ринку короткострокових контрактів (спот-ринок). Це формує високий рівень конкуренції між усіма учасниками ринку, що сприяє оптимізації ціноутворення на ринку електроенергії.

Модель з нерегульованою оптовою і роздрібною торгівлею електроенергією є однією з найбільш досконалих моделей організації ринків

електроенергії. Вона надає кінцевим споживачам можливість вибрати постачальника, а роздрібним продавцям – конкурувати між собою при укладенні договорів на постачання. Це створює ринкову конкуренцію серед суб'єктів ринку, забезпечуючи вільний доступ зовнішніх виробників і споживачів, а також фінансових посередників.

В Україні з 2000 по 2019 рік діяла модель пулу. Вироблена електроенергія продавалася виробниками на Оптовий ринок електричної енергії (ОРЕ) України через Державне підприємство «Енергоринок». ДП «Енергоринок» реалізовувало енергію постачальникам за регульованими (обленерго) та нерегульованими (незалежні постачальники) тарифами для подальшого постачання споживачам. Усі ліцензовані виробники та постачальники електроенергії були членами ОРЕ і працювали відповідно до укладених договорів з ДП «Енергоринок». Ринок регулювався адміністративно, шляхом встановлення регулятором (НКРЕКП) цін на генерацію, передачу та постачання електроенергії, а також шляхом регулювання урядом України цін для домогосподарств та інших захищених категорій споживачів.

Ця модель ринку вважалася неефективною, оскільки призводила до безперервного зростання цін для кінцевих споживачів та погіршення технічного стану електроенергетичної галузі України. Законодавство щодо впровадження нових моделей енергетичних ринків визначило цілі України щодо організаційних та функціональних перетворень у сфері енергетики.

Модель відкритого конкурентного ринку електроенергії передбачає створення організаційно-інституційної структури для функціонування та регулювання різних сегментів енергетичного ринку. Ці сегменти працюють за різними механізмами, але узгоджено, забезпечуючи стабільне та стійке енергозабезпечення споживачів за доступними цінами. На ринку електроенергії планується створення відкритого конкурентного ринку шляхом запровадження п'яти окремих сегментів організації ринку, більше 18 нових суб'єктів (елементів системи) та більше 20 формалізованих механізмів взаємовідносин між ними для врегулювання процесів функціонування ринку.

Конкурентна модель енергетичного ринку має забезпечити ефективне функціонування кількох ключових сегментів ринку, кожен з яких відіграє важливу роль у забезпеченні стабільного постачання та споживання енергоресурсів:

1. Ринок двосторонніх договорів (РДД): Це неорганізований сегмент, де укладаються довгострокові контракти між покупцем та продавцем на майбутні періоди, забезпечуючи стабільність поставок та цін.

2. Ринок на добу наперед (РДН): Покупці та продавці укладають контракти на купівлю-продаж енергії для наступного дня, що дозволяє забезпечити передбачуваність і баланс попиту та пропозиції.

3. Внутрішньодобовий ринок (ВДР): Продається електрична енергія впродовж доби після завершення торгів на РДН, що забезпечує безперервне постачання енергії, пристосовуючись до змін у споживанні.

4. Балансуючий ринок (БР): Тут проводиться балансування обсягів виробництва та споживання електричної енергії в реальному часі, що допомагає уникнути надлишку або дефіциту енергії в системі.

5. Ринок допоміжних послуг (РДП): Оператор системи передачі купує послуги для забезпечення стабільності роботи інших сегментів ринку, такі як регулювання попиту та акумулювання енергії для її повернення в систему у пікові години споживання.

Для ефективної роботи цих сегментів необхідна інституційно-організаційна структура, яка включає такі важливі елементи:

- Регулятор: Встановлює правила та регламентує діяльність учасників ринку.
- Споживач: Покупець електричної енергії, включаючи домогосподарства та підприємства.
- Вразливі споживачі: Згідно з законодавством, це категорії споживачів, які отримують підтримку для оплати енергії та захисту від відключень.
- Постачальник: Суб'єкт, що продає електричну енергію споживачам.

- Постачальник «останньої надії»: Постачальник, що зобов'язаний укласти договір з будь-яким споживачем на обмежений період.
- Виробник: Суб'єкт, що виробляє електричну енергію.
- Гарантований покупець (ГП): Відповідальний за купівлю енергії у виробників за «зеленими» тарифами та за виконання інших функцій для забезпечення загальносуспільних інтересів.
- Оператор ринку: Юридична особа, яка організовує функціонування РДН та ВДР.
- Оператор системи передачі (ОСП): Відповідає за експлуатацію та розвиток системи передачі енергії.
- Оператор системи розподілу (ОСР): Відповідає за безпечну та ефективну експлуатацію системи розподілу електричної енергії.

Ця структура дозволяє забезпечити належне функціонування енергетичного ринку, ефективно інтегруючи різні аспекти енергетичної безпеки та економічної стабільності.

Для забезпечення ефективної взаємодії на ринку електричної енергії важливою є формалізація відносин між учасниками через встановлення чітких договорів та угод, що регулюють їх діяльність. Найбільш важливими серед цих формалізованих актів є:

1. Двосторонній договір купівлі-продажу електричної енергії: Це основний договір між продавцем і покупцем енергії на ринку, який забезпечує стабільність постачання та передбачуваність цін.
2. Договори на ринках РДН та ВДР: Ці договори укладаються для купівлі-продажу енергії на ринку доби наперед та внутрішньодобовому ринку, а також для урегулювання небалансів, надання послуг з передачі та розподілу, а також допоміжних послуг.
3. Договори постачання та інших послуг: Це включає договори про постачання енергії споживачам, постачання енергії постачальником «останньої надії», надання послуг з комерційного обліку енергії, а також купівлю-продаж енергії за «зеленими» тарифами.

4. Інші договори: Це всі угоди, що регулюють взаємовідносини між учасниками ринку згідно з чинними нормативно-правовими актами, такими як угоди щодо забезпечення функціонування ринку електричної енергії та виконання загальносуспільних інтересів.

Загальна мета запровадження нової моделі ринку електричної енергії полягає в досягненні кількох ключових цілей:

1. Поліпшення умов для споживачів: Забезпечення можливості для кінцевих споживачів самостійно обирати постачальника, укласти довгострокові контракти та планувати витрати, що дозволить отримувати якісніші послуги.

2. Скасування монополії на енергоринку: Поступова ліквідація монополістичних структур та забезпечення вільної конкуренції серед постачальників енергії.

3. Вільне ціноутворення: Упровадження механізмів вільного ціноутворення, що дозволяє ринку визначати ціни в залежності від попиту та пропозиції, що стимулює більш ефективне використання ресурсів.

4. Створення конкурентного середовища: Вихід з монополізованого ринку через формування відкритого і конкурентного середовища, яке підвищує ефективність енергетичного сектору та забезпечує кращі умови для споживачів.

Загалом, ці зміни сприяють формуванню більш прозорої та ефективної енергетичної системи, що дозволяє адаптуватися до сучасних вимог ринку та забезпечує сталий розвиток сектору.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Запровадження нової моделі енергетичного ринку є складним і багатоступеневим процесом, що потребує ретельної організації та часу для адаптації до змін. Окрім очевидних затримок у реалізації всіх необхідних елементів ринку, важливими факторами, які ускладнюють цей процес, є:

1. Необхідність забезпечення якості технологічного та ресурсного забезпечення: Модель ринку потребує надійної технічної інфраструктури, що включає в себе сучасні електричні мережі, системи управління та автоматизації, а також оновлені технології для балансування і моніторингу ринку. Збереження і модернізація цих систем вимагають значних інвестицій та часу для їх впровадження.

2. Відповідність кваліфікації персоналу новим вимогам: Перехід до ринкової моделі вимагає висококваліфікованих кадрів, здатних адаптуватися до нових стандартів і правил, що визначають функціонування ринку. Проблеми можуть виникнути через недостатній рівень підготовки існуючого персоналу, а також необхідність навчання нових спеціалістів.

3. Дотримання правил функціонування ринку: Учасники ринку повинні дотримуватися нових норм та правил, що передбачають конкуренцію, прозорість і ефективність. Проте, в перехідний період можливі спроби зловживань чи недотримання вимог, що може привести до нестабільності або недовіри до ринку.

4. Відсутність конфлікту інтересів: Важливим є забезпечення того, щоб інтереси різних учасників ринку — від держави та регуляторів до постачальників і споживачів — були збалансовані, без впливу негативних факторів чи лобістських впливів, що можуть заважати належному функціонуванню ринку.

5. Збереження управлінського лідерства в умовах трансформаційного періоду: Перехід до нової моделі ринку потребує потужного управлінського

лідерства, яке здатне забезпечити стабільність, підтримувати стратегічні цілі та ефективно координувати процеси в умовах змін.

Таким чином, ефективне функціонування нової моделі енергетичного ринку вимагає комплексного підходу та довгострокового періоду для адаптації до нових умов. Затримки на будь-якому етапі можуть уповільнити процес трансформації, тому важливо, щоб усі елементи системи працювали в тандемі і відповідали вимогам змін.

РОЗДІЛ 2. КОНТРОЛЬ НАПРУГИ ТА ЧАСТОТИ ЗБАЛАНСОВАНОЇ/НЕСБАЛАНСОВАНОЇ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ SMES ЗА НАЯВНОСТІ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ

2.1. Конфігурація системи

На рисунку 2.1. показано досліджувану систему, яка використовується як приклад, і складається з 33-шинної системи, підключеної до мережі як основного джерела живлення. Вітрогенератор і системи SMES підключені до шин 18 і 33, оскільки ці шини являють собою найслабші місця з точки зору профілю напруги [50].

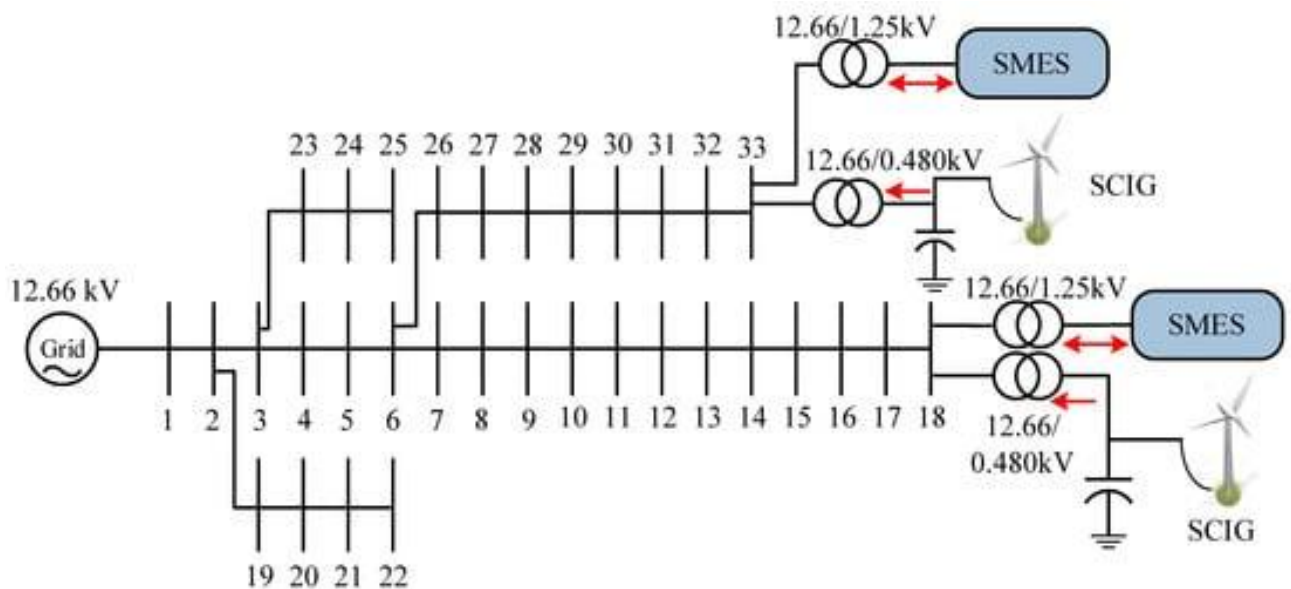


Рисунок 2.1. – Система радіального розподілу з 33 шин як тестова система

Дані про лінії та автобуси можна знайти в [51]. У таблиці 1 представлені дані системи SCIG і системи SMES, які будуть обговорюватися в наступних розділах.

Таблиця 2.1. – Параметр системи

Параметр	одиниця	Значення
Середньоквадратична напруга системи	кВ	12.66
Системна частота	Гц	50
Система SCIG		
Номінальна потужність	MVA	0,6/0,9
Середньоквадратична напруга	В	480
Опір статора, P_c	pu	0,01965
Реактивний опір статора, X_c	pu	0,0397
Опір ротора, $R_{об}$	pu	0,01909
Реактивний опір ротора, X_p	pu	0,0397
Реактивний опір намагнічування, X_m	pu	1,354
система SMES		
SMES енергія, E_{SMES}	MJ	1.0
Індуктивність котушки SMES, L_{SMES}	X	0,5
СМЕС поточний, $I_{СМЕС}$	A	2000 рік
Напруга зв'язку шини постійного струму, B зв'язку постійного струму	В	2400
Ємність шини постійного струму, C зв'язку постійного струму	мФ	10

2.2. Модель вітрової системи

SCIG використовується як генератор із системою вітрової турбіни. Конденсаторна батарея підключена до SCIG для введення реактивної потужності та підвищення коефіцієнта потужності. Механічну вихідну потужність генератора можна обчислити за рівнянням (2.1) [52]. Еквівалентна схема SCIG і відповідне рівняння моделі представлені в [38, 53].

$$P_m = 0,5CP(\lambda, \beta) \rho A v_{wind}^3 \quad (2.1)$$

де A – площа турбіни, ρ – густина повітря, v – швидкість вітру, CP – коефіцієнт продуктивності турбіни.

де CP залежить від співвідношення обертів наконечника (λ) і кут нахилу лопаті (β). Де CP SCIG можна розрахувати за рівняннями (2.2) і (2.3) [54].

$$C_P(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{-C_5/\lambda_i} + C_6\lambda_i \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2.3)$$

де CP – коефіцієнт продуктивності турбіни, λ це співвідношення швидкості наконечника, β – кут нахилу лопаті, а значення коефіцієнтів $C_1 - C_6$ становлять відповідно 0,5176, 116, 0,4, 5, 21, 0,0068.

Модель SMES

Блок SMES – це тип ВДЕ, який залежить від зберігання енергії в магнітній формі. На рисунку 2.2 представлені основні компоненти системи SMES: система захисту, кріогенний холодильник, кріостат/вакуумна ємність для збереження котушки в надпровідному стані, надпровідна котушка та система кондиціонування живлення, яка складається з двох частин — VSC і DC-DC подрібнювач. Енергію SMES (E_{smes}) і потужність SMES (P_{smes}) можна обчислити за рівняннями (2.4) і (2.5), враховуючи струм SMES (I_{smes}) та індуктивність (L_{smes}).

$$E_{smes} = \frac{1}{2} L_{smes} I_{smes}^2 \quad (2.4)$$

$$P_{smes} = \frac{dE_{smes}}{dt} = L_{smes} I_{smes} \frac{dI_{smes}}{dt} = V_{smes} I_{smes} \quad (2.5)$$

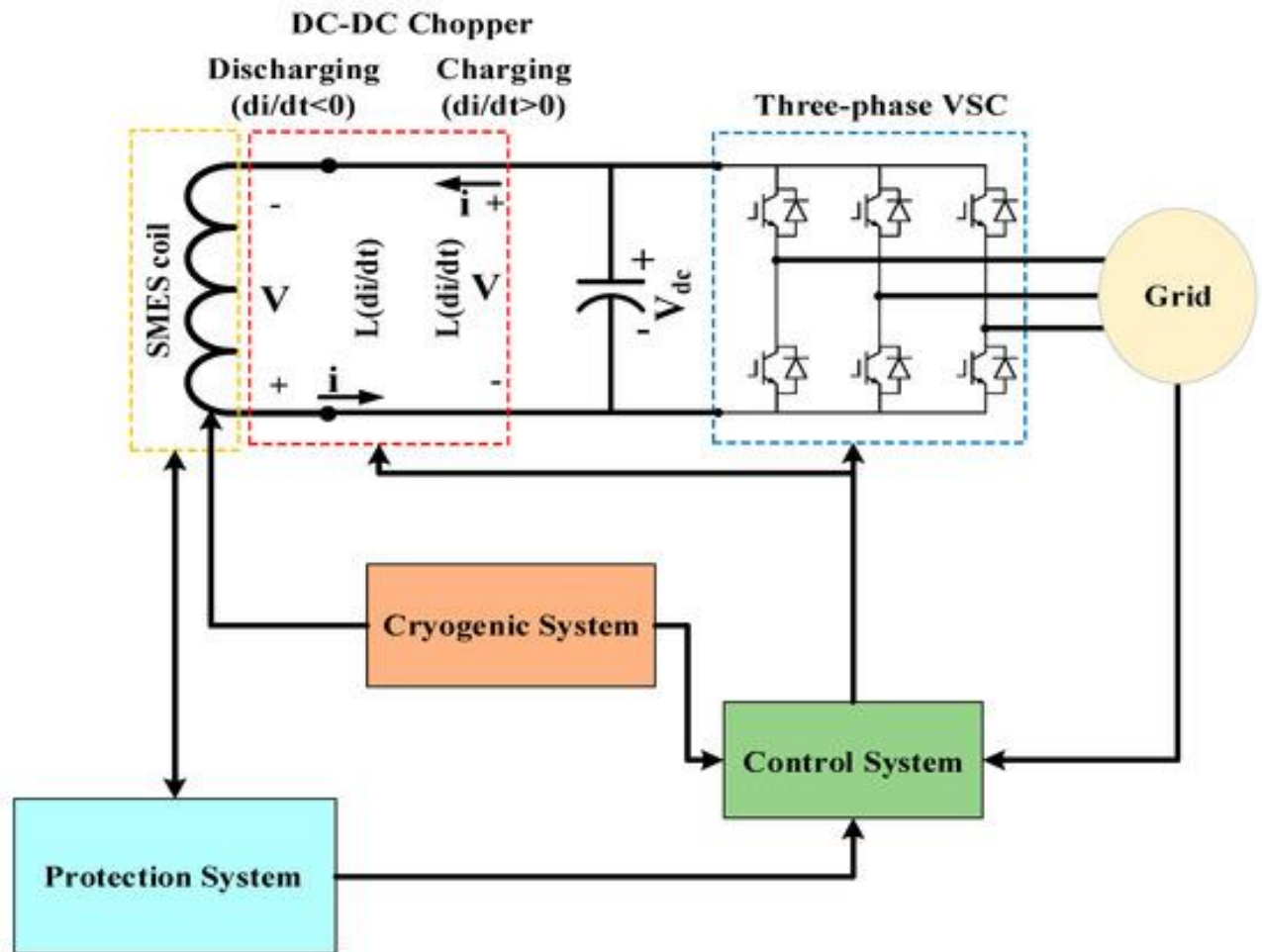


Рисунок 2.2. – Конфігурація системи SMES.

2.3. Запропонована методика управління МСП

На рисунку 2.3 зображено загальний контроль SMES, який має дві ключові фази. Перша фаза – це двонаправлений VSC для керування реактивною потужністю, що вводиться/поглинається до/з мережі блоком SMES. Керування VSC залежить від ПІ-регулятора, а структура моделювання перетворювачів джерела напруги представлена в [55, 56]. Друга фаза – це DC-DC чоппер, який контролює активну потужність, що вводиться/поглинається в/з мережі блоком SMES. FLC використовується з SMES для виконання процесу заряджання та розряджання. FLC має два входи та один вихід. Перший вхід (d_{Vwind}) є різницею між фактичною швидкістю вітру та

номінальною швидкістю вітру; другий вхід (d_{Ismes}) є різницею між фактичним струмом SMES і його опорним значенням. Вихідний сигнал є робочим циклом (D) порівняно з високою частотою перемикавання для запуску перемикачів DC-DC.

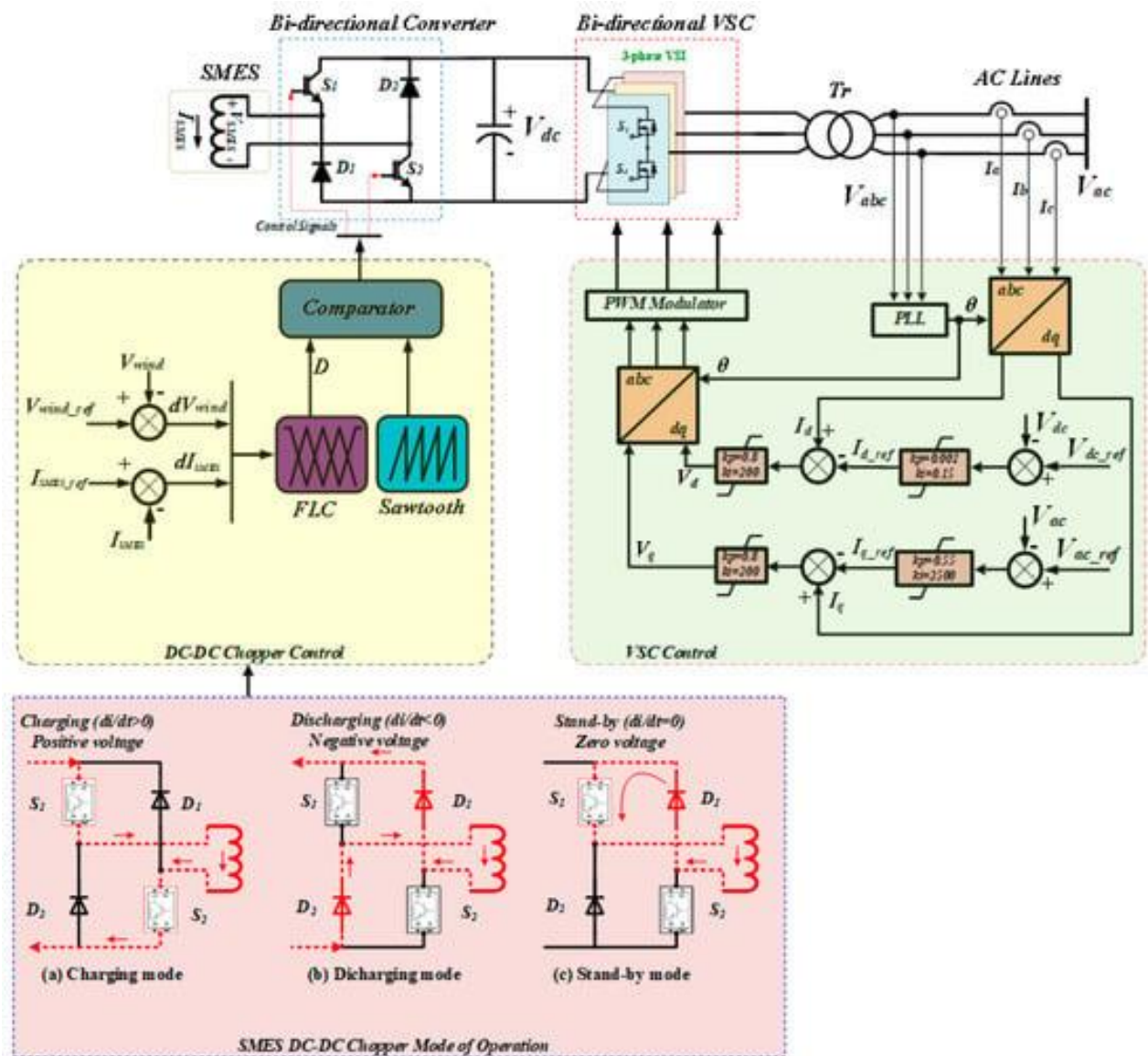


Рисунок 2.3. – Загальна запропонована система управління

Таким чином, SMES DC-DC має три режими, як показано на рисунку 2.3. Перший режим - це режим зарядки; коли D досягає умови $0,5 < D \leq 1$, на котушці SMES з'являється позитивна напруга. Другий режим - це режим очікування, коли напруга на котушці дорівнює нулю і $D = 0,5$. Третій режим - режим розрядки; на котушці SMES з'являється негативна напруга і $0 \leq D < 0,5$.

Кожна змінна FLC має п'ять наборів функцій належності (MF). IF–AND–THEN використовуються для перетворення правил нечіткого керування в чіткі керуючі дії. Загальне запропоноване керування DC-DC чоппером показано на рисунку 2.4. Перший вхід (d_{vwind}) і другий вхід (d_{Ismes}) мають п'ять наборів MF (NL = негативний великий, NS = негативний малий, Z = нуль, PS = позитивний малий, PL = позитивний великий); тим часом вихід (D) має п'ять наборів MF (DL = Великий розряд, DS = Малий розряд, NOA = Без дії, CS = Малий заряд, CL = Великий заряд).

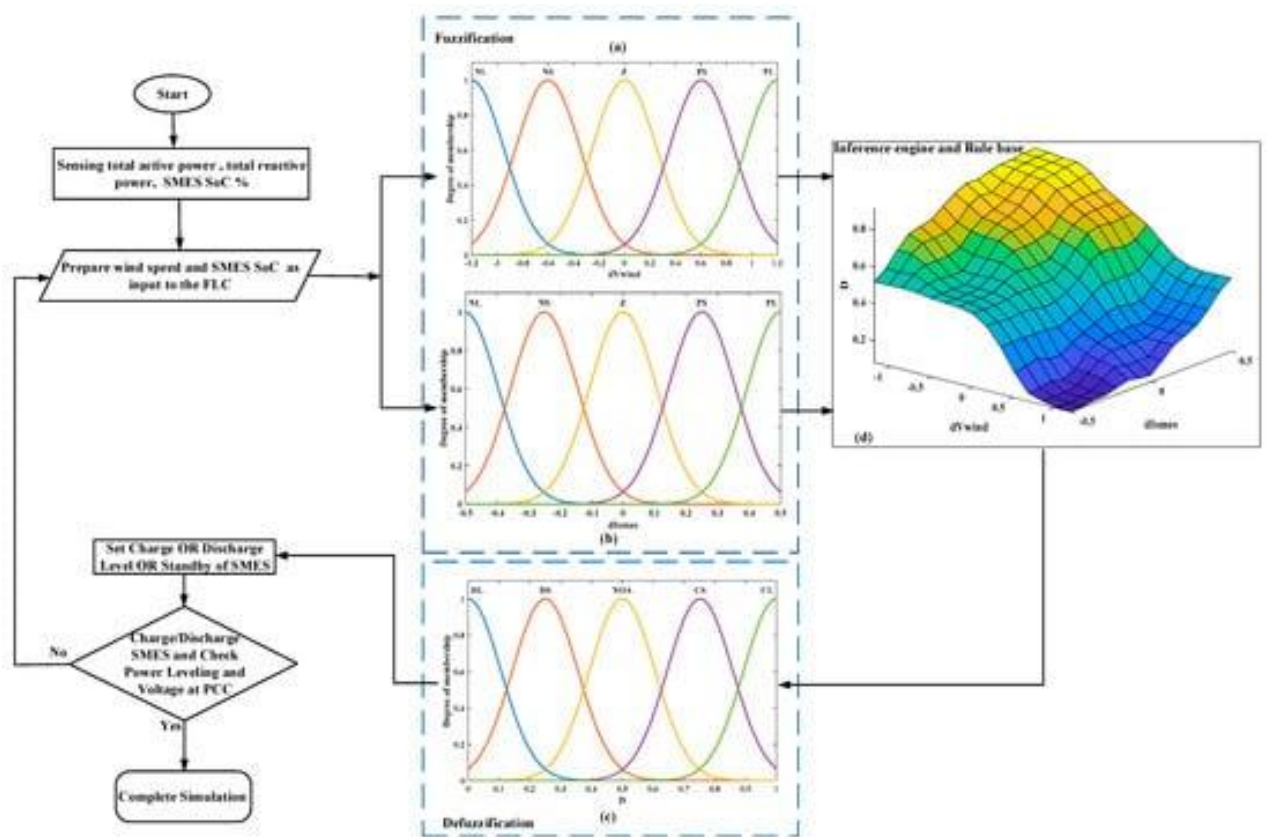


Рисунок 2.4. – Пропонована система керування DC-DC подрібнювачем на основі FLC

2.4. Результати моделювання та їх обговорення

Запропонований FLC-SMES досліджується у збалансованому та незбалансованому випадках для покращення напруги та частоти системи

розподілу шини IEEE 33 та досягнення вирівнювання потужності вітрової системи за наявності SCIG на основі вітру під час поривів вітру, як показано на рисунку 2.5.

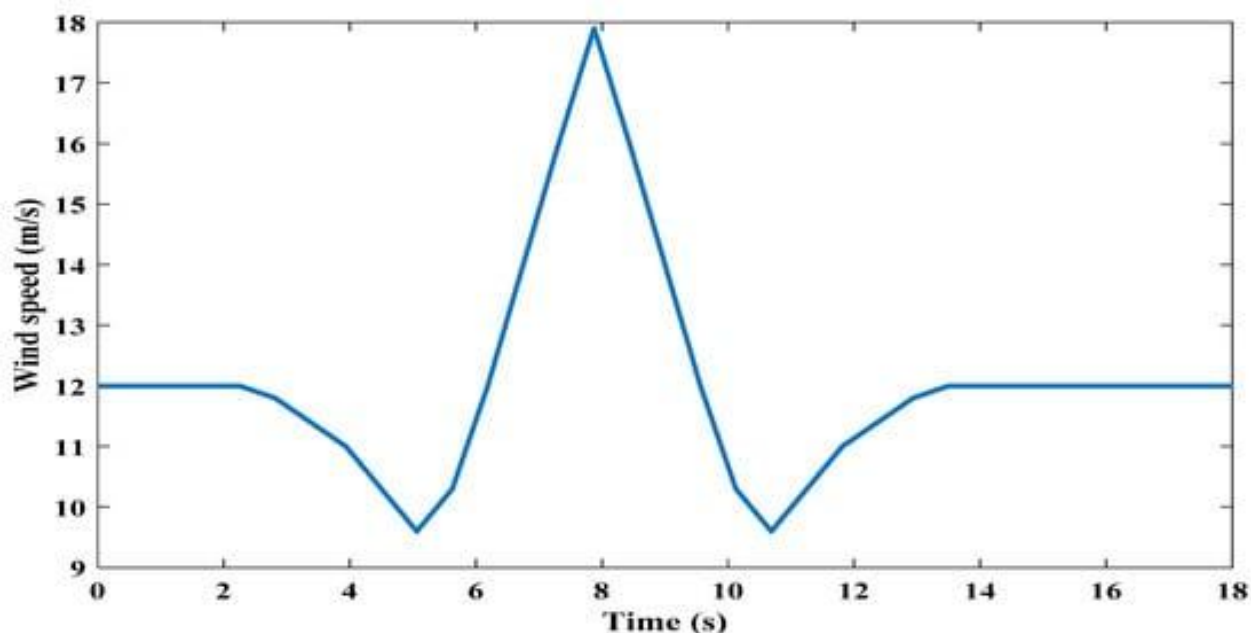
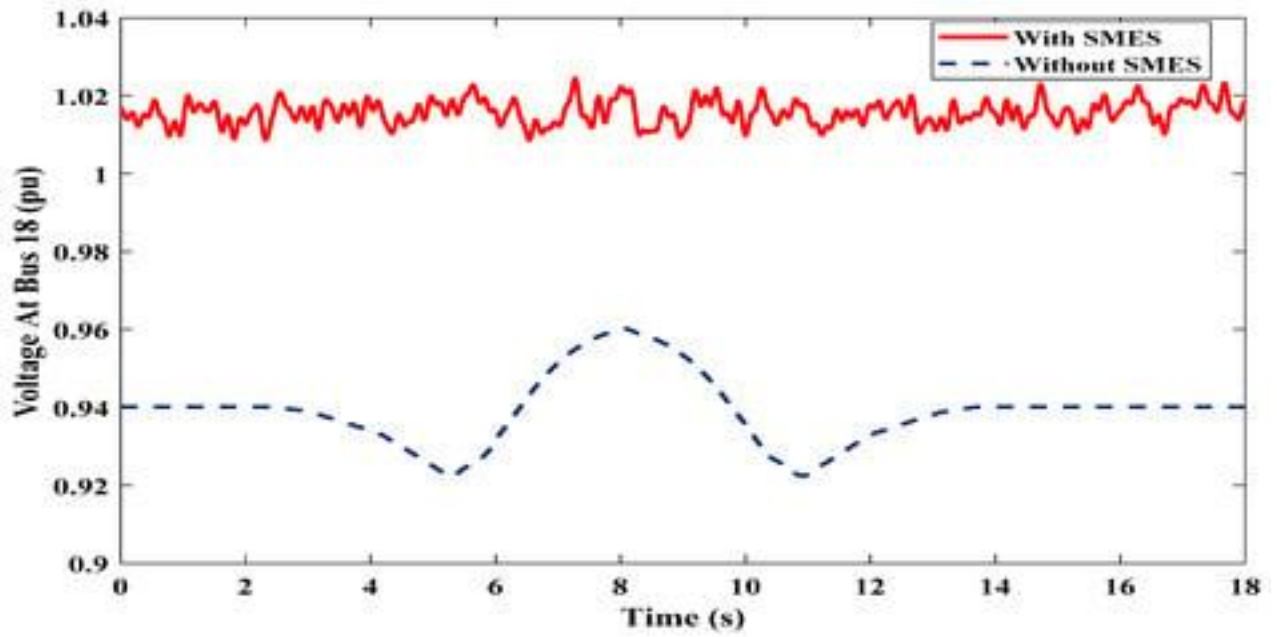


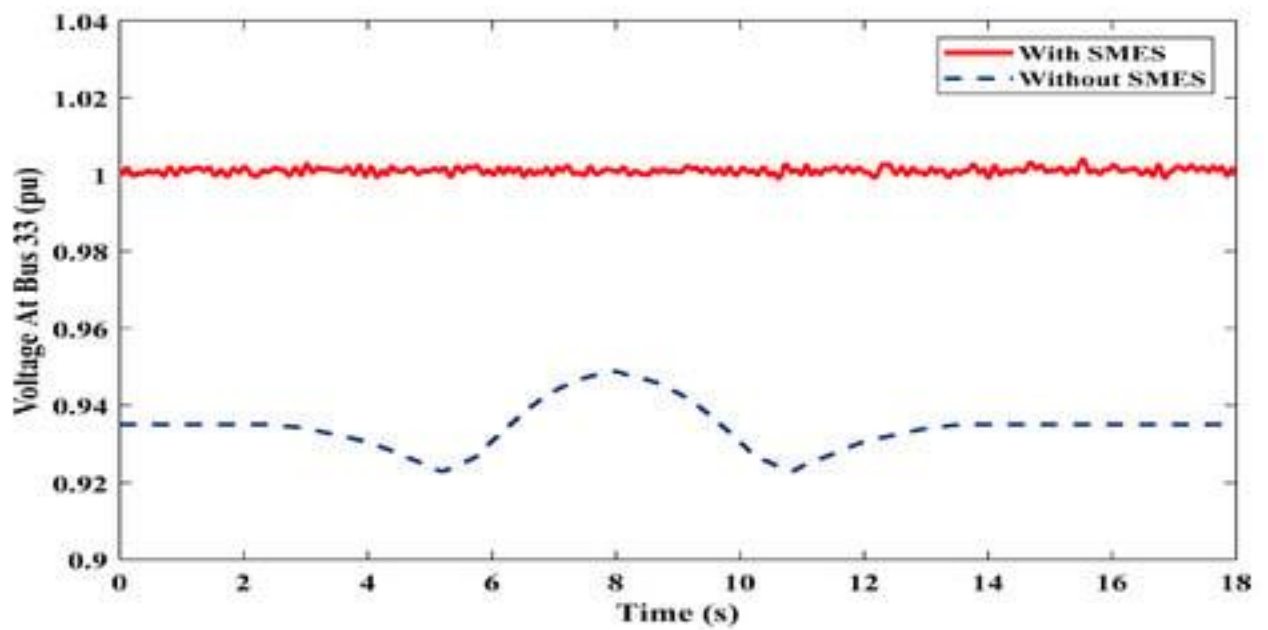
Рисунок 2.5. – Порив вітру

2.4.1. Збалансований корпус

Проаналізуємо продуктивність збалансованої розподільчої системи IEEE 33. Напруги на шинах 18 і 33 відображені на рисунку 2.6. а, б відповідно. Напруга в корпусі SMES на шинах 18 і 33 покращується і підтримується в допустимих межах. На шині 18 напруга підвищується з менш ніж 0,94 о.е. до приблизно 1,02 о.е., а на шині 33 — з менш ніж 0,94 о.е. до 1,0 о.е. Окрім покращення напруги, коливання частоти успішно пом'якшуються завдяки використанню системи SMES із контролером, як показано на рисунку 2.7.



(a)



(b)

Рисунок 2.6. – Характеристика напруги для збалансованого випадку: (а)
шина 18 (б) шина 33

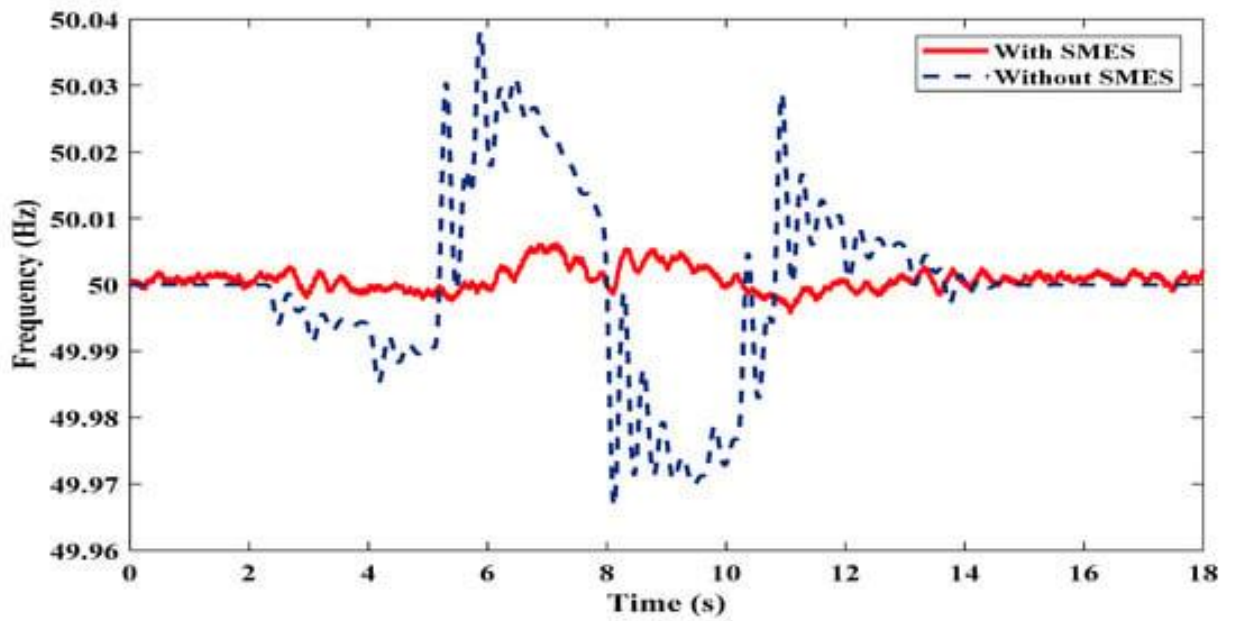


Рисунок 2.7. – АЧХ у збалансованому корпусі

Потужності, подані на шину 18 і 33, як показано на рисунку 8 а, б, успішно згладжуються, де запропонований SMES-FLC досягає стратегії вирівнювання потужності для підвищення стабільності системи. Крім того, потужність, що надходить від мережі, мінімізується та згладжується як причина для зарядки (позитивний знак) і розрядки (від’ємний знак) від SMES, як показано на рисунках 2.9 і 2.10.

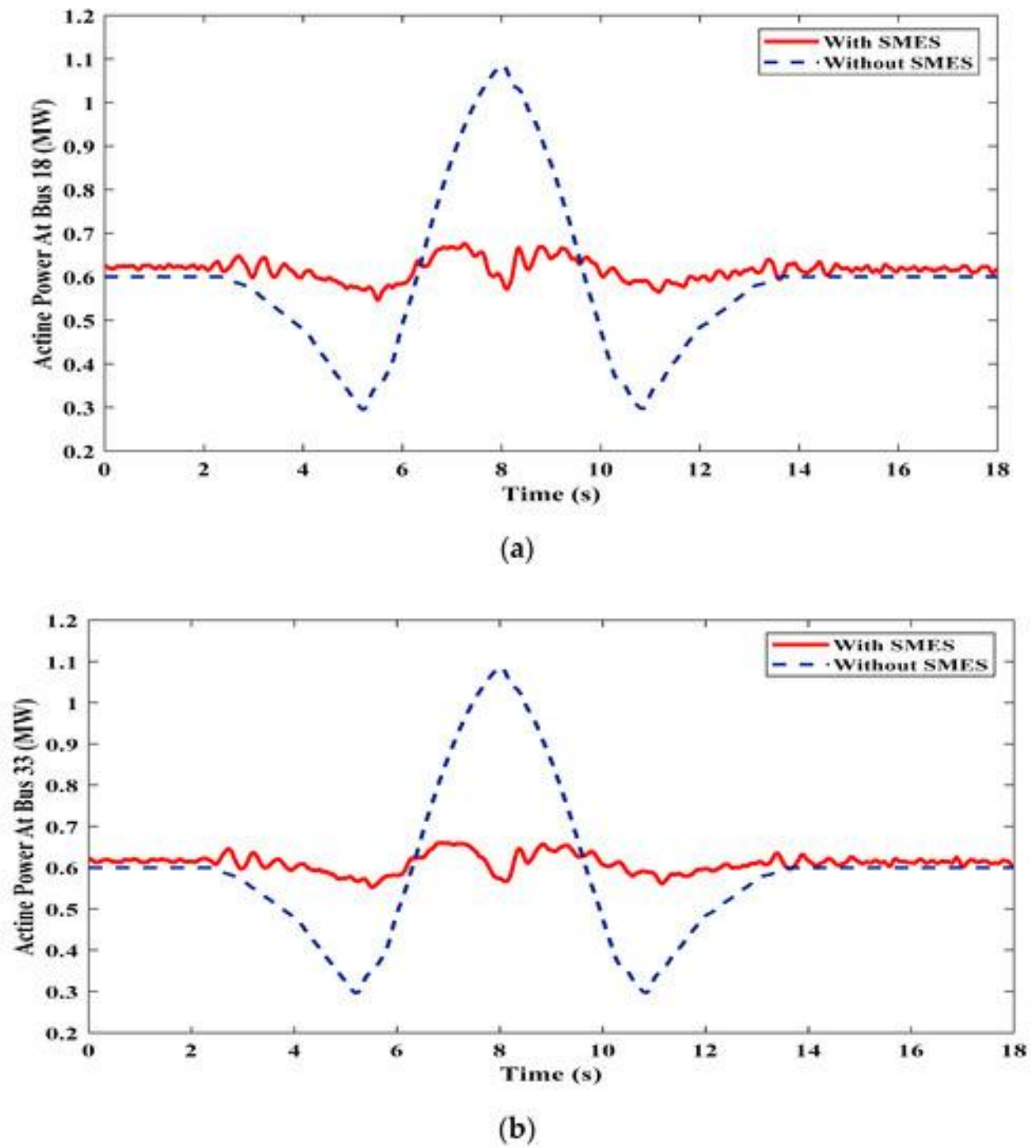


Рисунок 2.8. – Активна потужність, що надходить на (а) шину 18, (б) шину 33

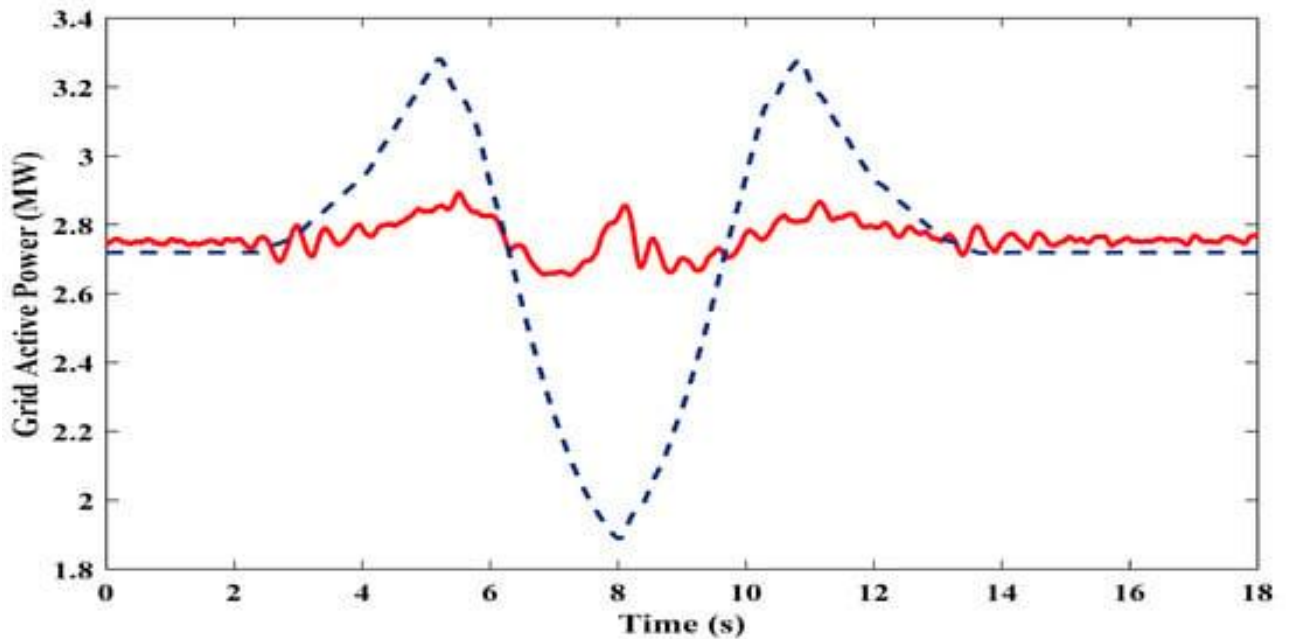


Рисунок 2.9. – Активна потужність мережі

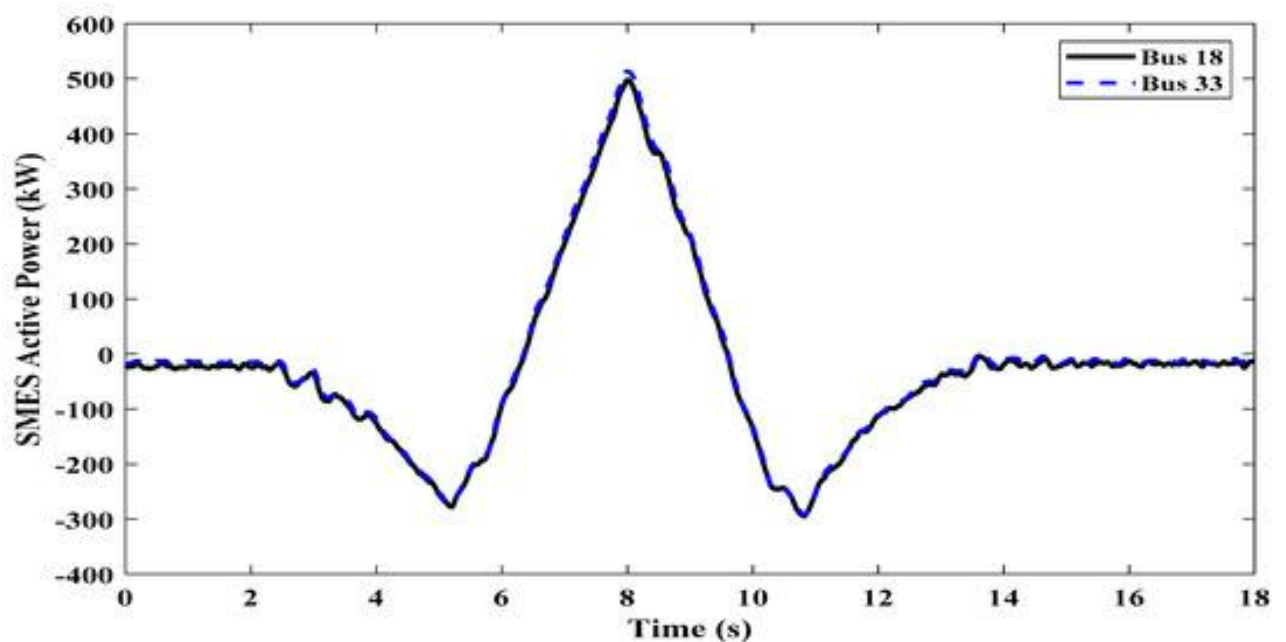


Рисунок 2.10. – Активна потужність SMES

Реактивна потужність мережі зменшується, як показано на рисунку 2.11., оскільки SMES вводить реактивну потужність у мережу та вітрову систему, як показано на рисунку 2.12., що допомагає покращити коефіцієнт потужності та продуктивність мережі. Експлуатаційні характеристики SMES показані на рисунках 2.13., 2.14. та 2.15. На рисунках 2.13. і 2.14. показано роботу зарядки та розрядки SMES під час поривів вітру. На рисунку 2.15. показано напругу

шини постійного струму, яка є постійною протягом загального часу та підтверджує процес системи керування.

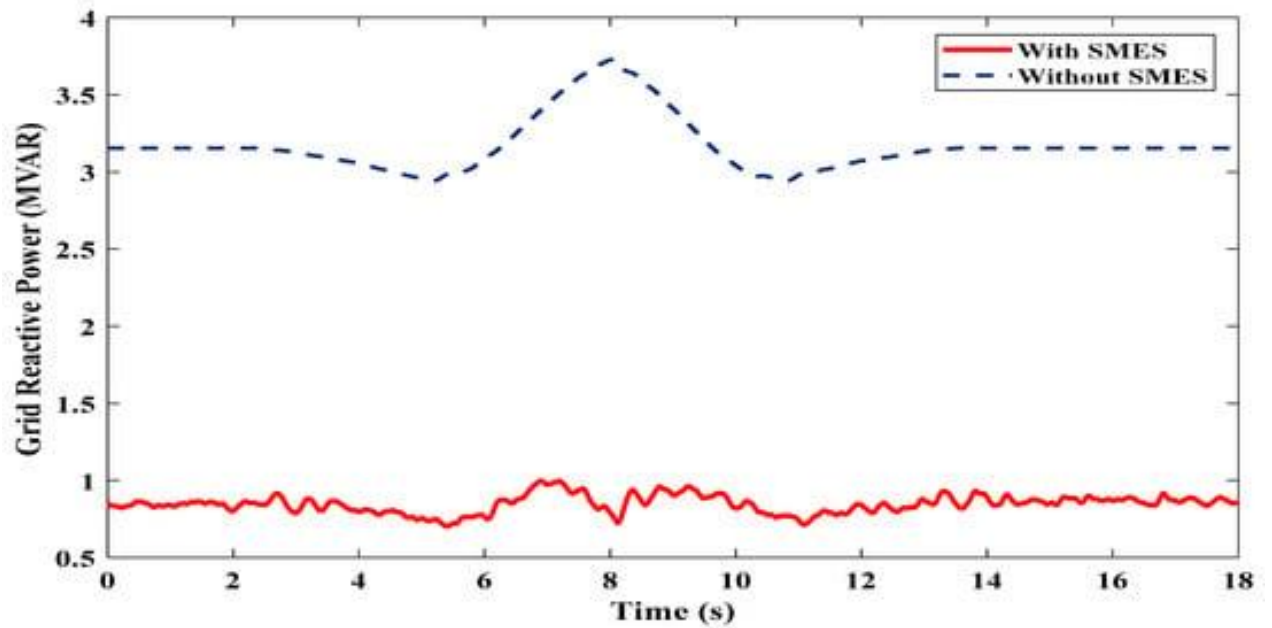


Рисунок 2.11. – Реактивна потужність мережі

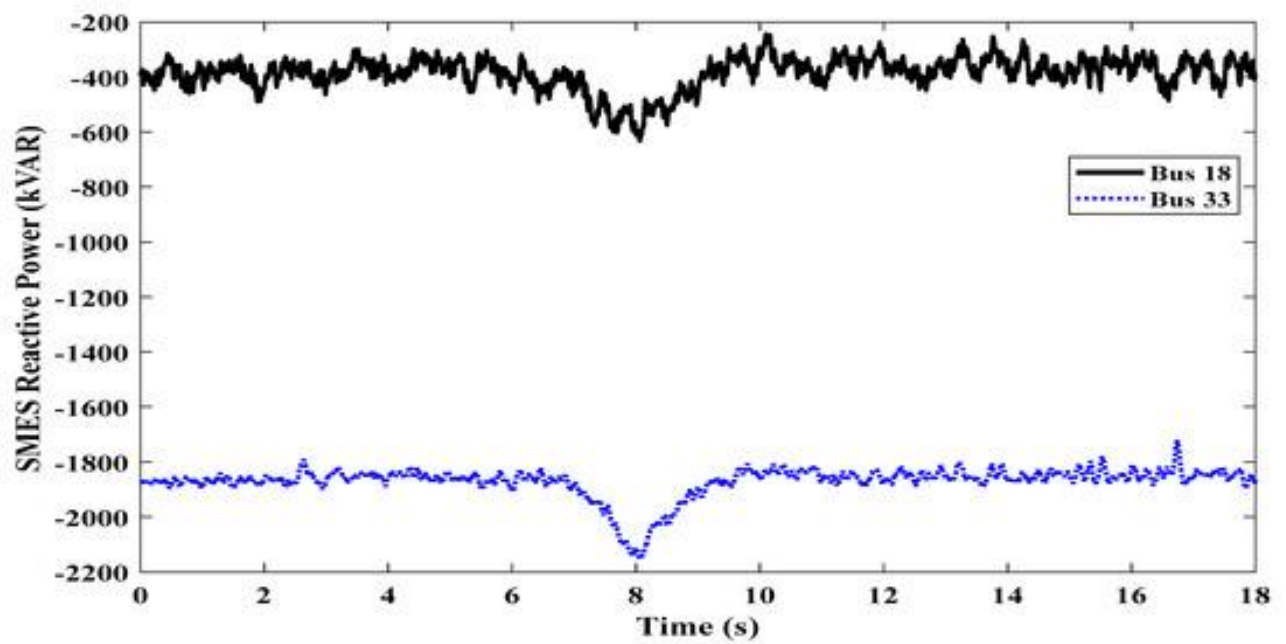


Рисунок 2.12. – Реактивна потужність SMES

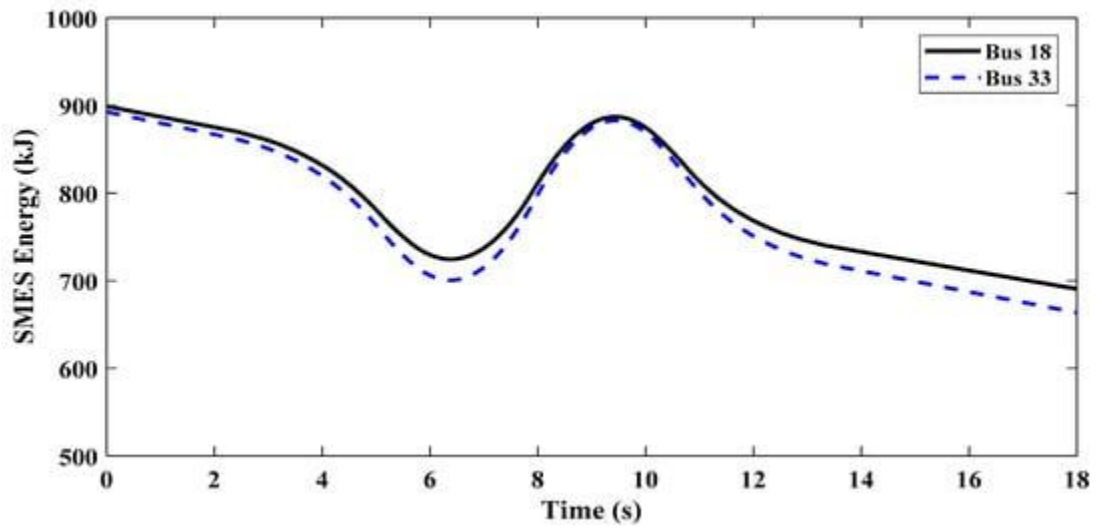


Рисунок 2.13. – Енергія SMES

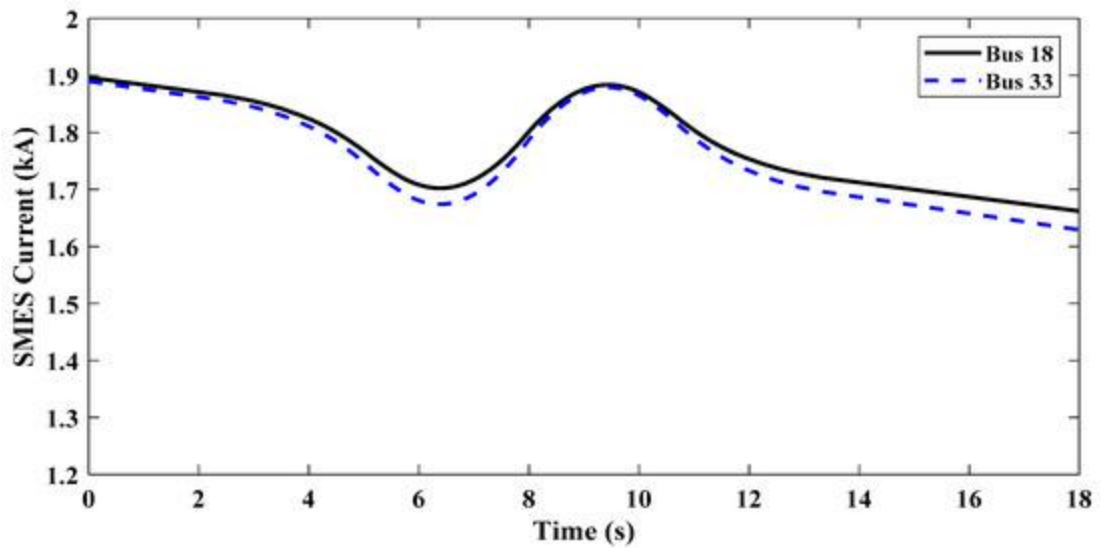


Рисунок 2.14. – Струм SMES

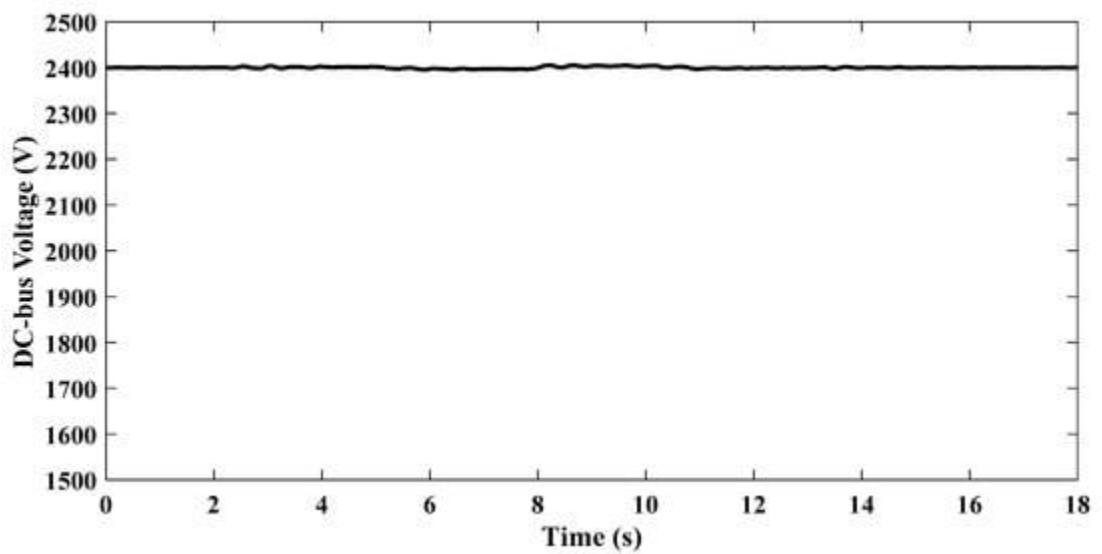


Рисунок 2.15. – Напруга шини постійного струму

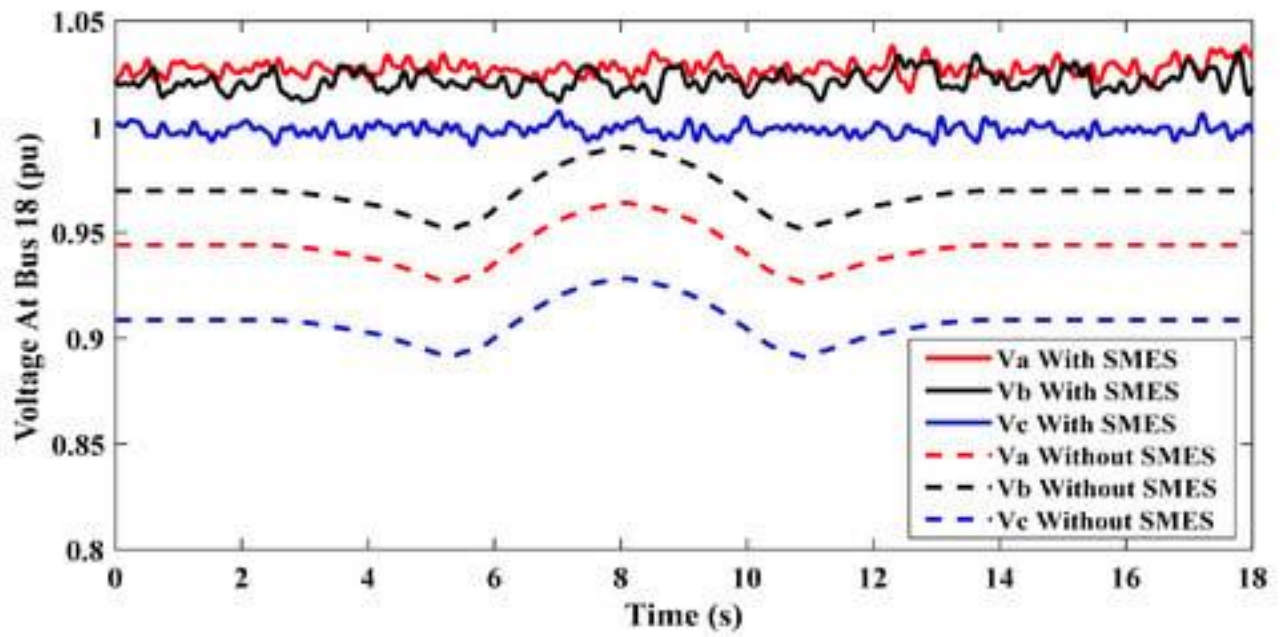
У таблиці 2.2. наведено численні результати збалансованого випадку з FLC-SMES і без нього. Значення напруги під час пориву вітру на шинах 18 і 33 покращуються при активації системи SMES. При швидкості вітру нижче номінального значення напруга на шині 18 досягає 0,922 о.е. без SMES і 1,01 з SMES; напруга на шині 33 досягає 0,923 о.е., якщо SMES вимкнено, і 1,001, якщо SMES активовано. Однак, коли швидкість вітру перевищує номінальне значення, характеристика напруги на шинах 18 і 33 досягає 0,960 і 0,948 відповідно без системи SMES. Тим часом, за наявності SMES, відповідь напруги на шині 18 і 33 досягає 1,024 і 1,004 відповідно. Система SMES має можливість підтримувати мережу реактивною потужністю для пом'якшення коливань напруги під час поривів вітру; регулювання реактивної потужності використовується з VSC на основі ПІ-регулятора. Таким чином, SMES підтримував мережу реактивною потужністю близько 0,4 МВАР на шині 18 і 1,85 МВАР на шині 33. Отже, максимальне значення реактивної потужності, що постачається з мережі, зменшується з 3,75 МВАР (без випадку SMES) до 1,00 МВАР (з корпусом SMES). Крім того, мінімальне значення реактивної потужності мережі зменшено з 2,95 МВАР (без урахування SMES) до 0,75 МВАР. Окрім підтримки мережі реактивною потужністю, система SMES здатна вводити активну потужність у мережу під час низької швидкості вітру та поглинати активну потужність під час високої швидкості вітру. Це допомагає досягти стратегії вирівнювання потужності для шин 18 і 33 і для мережі. Різниця між максимальним і мінімальним значенням активної потужності на шині 18 і шині 33 становить 0,4 МВт без системи SMES і 0,03 МВт з системою SMES. В мережі різниця між максимальним і мінімальним значенням активної потужності досягла 0,23 МВт (з варіантом SMES), замість 1,4 МВт (без випадку SMES). Це, у свою чергу, призвело до покращення частотної характеристики, де максимальне значення було мінімізовано з 50,038 Гц до 50,005 Гц, а мінімальне значення було мінімізовано з 49,965 Гц до 50,00 Гц. Крім того, було зменшено кількість циклів коливань.

Таблиця 2.2. – Чисельні результати збалансованого випадку

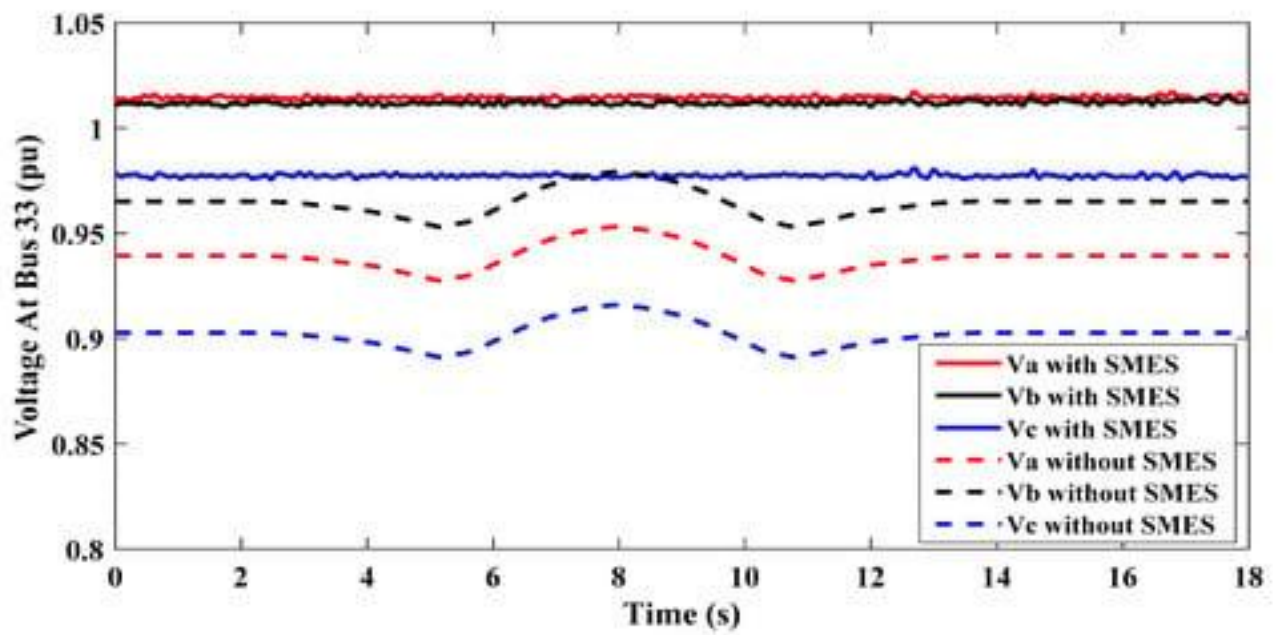
	Без МСП		З МСП	
	Максимум	мінімум	Максимум	мінімум
Напруга на шині 18 (о.е.)	0,960	0,922	1,024	1,010
Напруга на шині 33 (о.е.)	0,948	0,923	1,004	1,001
Частота (Гц)	50,038	49,965	50,005	50 000
Активна потужність при 18 (МВт)	0,650	0,250	0,420	0,390
Активна потужність при 33 (МВт)	0,650	0,250	0,420	0,390
Активна потужність мережі (МВт)	3,300	1,900	2,890	2,660
Реактивна потужність мережі (MVAR)	3,750	2,950	1000	0,750

2.4.2. Незбалансований корпус

Запропонований метод керування перевірено на незбалансованому випадку, де навантаження розподіляються між трьома фазами, а, b і c, відповідно на 30%, 20% і 50% загального навантаження. У цьому випадку покращуються характеристики напруги фаз а, b і c. Вважається, що фаза c має найбільше значення навантаження, тому напруга фази c є найгіршою. Відповіді напруги на шинах 18 і 33 для трьох фаз проілюстровано на рисунку 16 а, b; всі фази на шинах 18 і 33 успішно залишилися в межах при наявності системи SMES, що призвело до підтримки стабільності електроенергетичної системи. Флуктуації частоти також були затушені в незбалансованому випадку за наявності системи SMES, як показано на рисунку 2.17. Це, в свою чергу, підвищило стійкість енергосистеми під час пориву швидкості вітру в разі незбалансованого навантаження. Енергосистема стає більш надійною та стабільною завдяки контролю напруги та частоти за допомогою FLC-SMES.



(a)



(b)

Рисунок 2.16. – Характеристика напруги в незбалансованому випадку: (а) шина 18, (б) шина 33

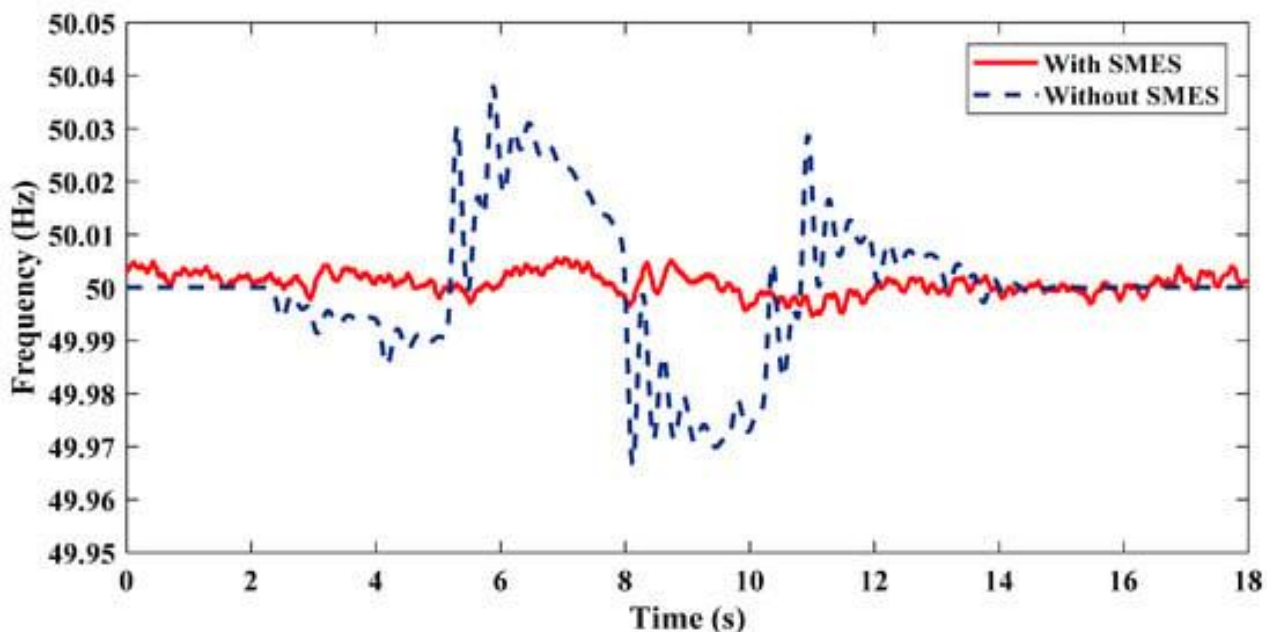
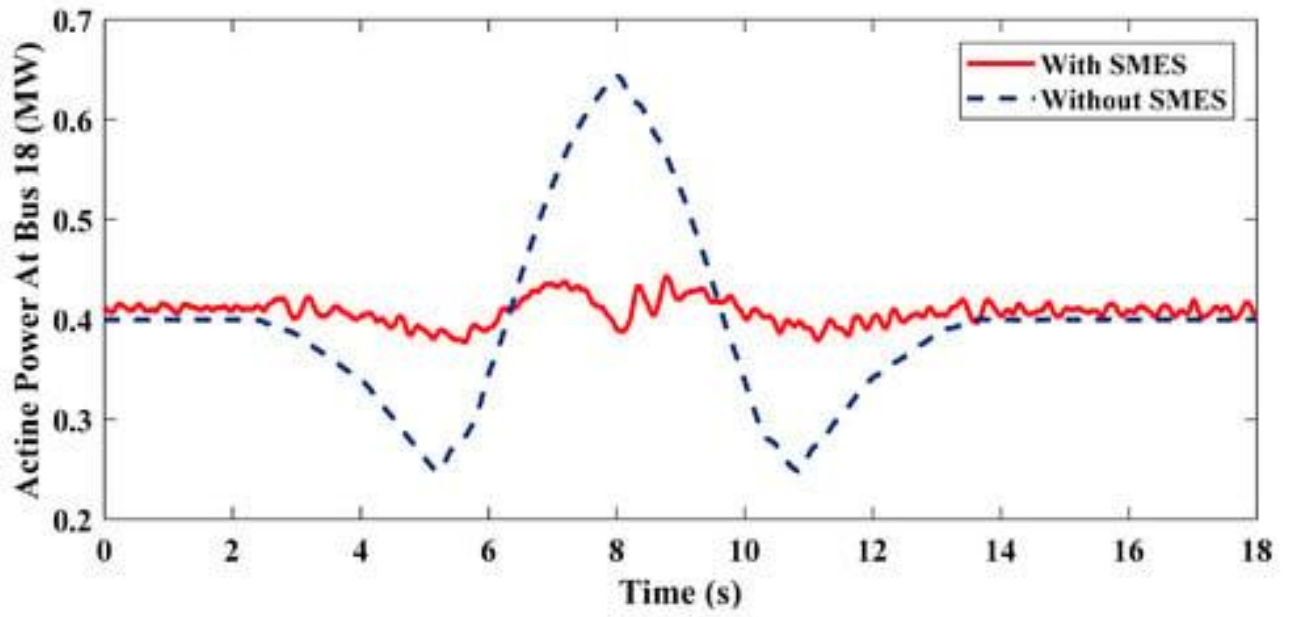
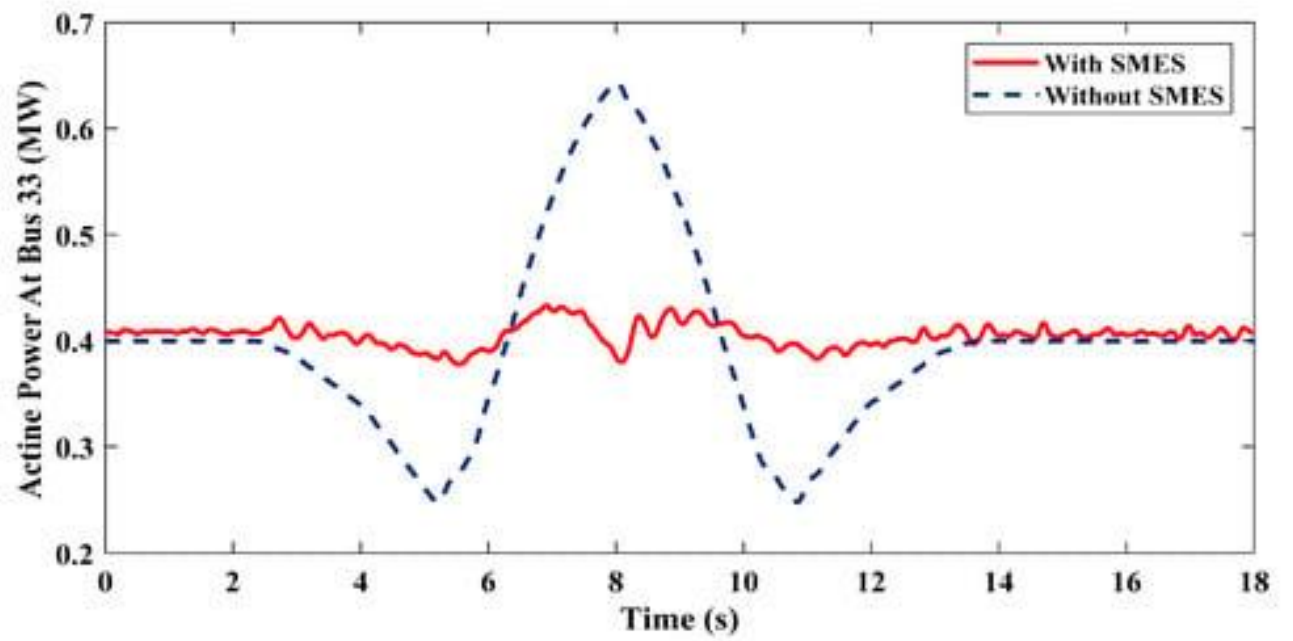


Рисунок 2.17. – Частота системи в незбалансованому випадку

Наявність SMES з контролером на шинах 18 і 33 забезпечувала вирівнювання потужності на цих шинах, як показано на рисунку 2.18 а, б відповідно; тим часом без SMES активна потужність коливається між 0,25 МВт і 0,65 МВт. Водночас у разі використання SMES це значення становить близько 0,4 МВт. Ця стратегія має позитивний вплив на мережу, оскільки активна потужність, що підтримується в системі мережею, має плавний відгук, як показано на рисунку 2.19 . Введена потужність коливається від 1,9 МВт до 3,3 МВт у випадку без SMES. Коли SMES активовано, активна потужність мережі коливається між 2,7 МВт і 2,9 МВт. Зменшення введеної активної потужності з мережі є результатом використання SMES, де SMES вводить активну потужність в мережу, як показано на рисунку 2.20. Від’ємний знак вказує на режим розрядки SMES, а потужність поглинається з мережі під час сильної зміни швидкості вітру. Позитивний знак вказує на режим зарядки SMES, а активна потужність вводиться в мережу під час слабкої зміни швидкості вітру.



(a)



(b)

Рисунок 2.18. – Активна потужність, подана на (а) шину 18, (б) шину

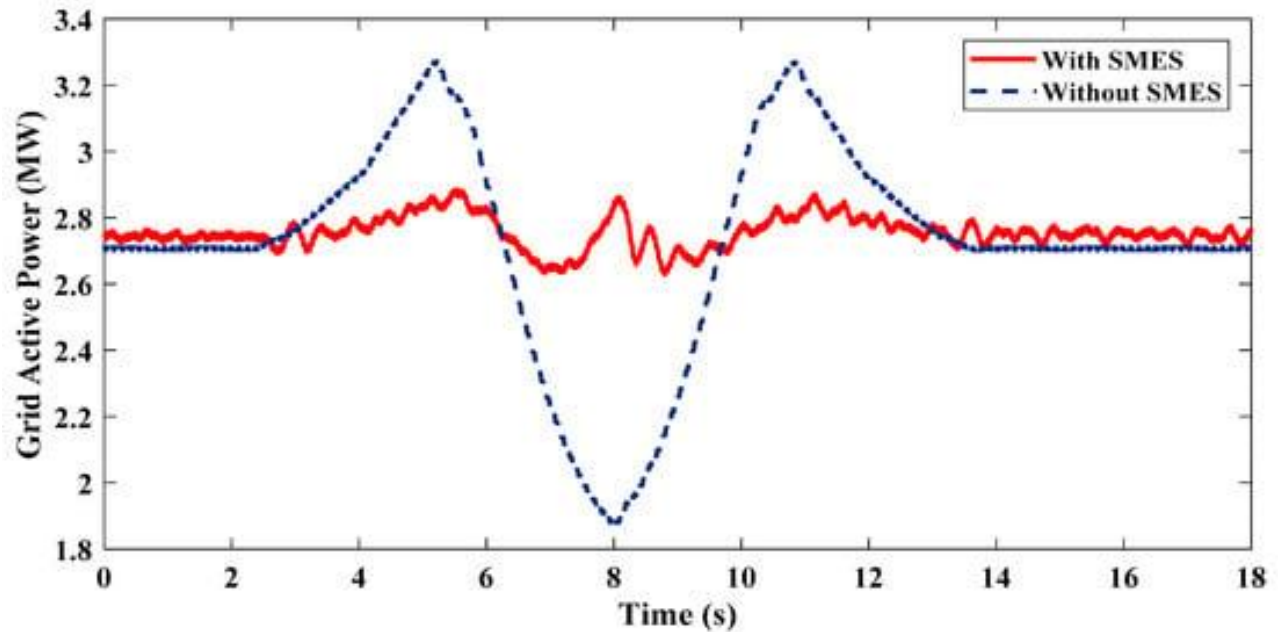


Рисунок 2.19. – Активна потужність мережі

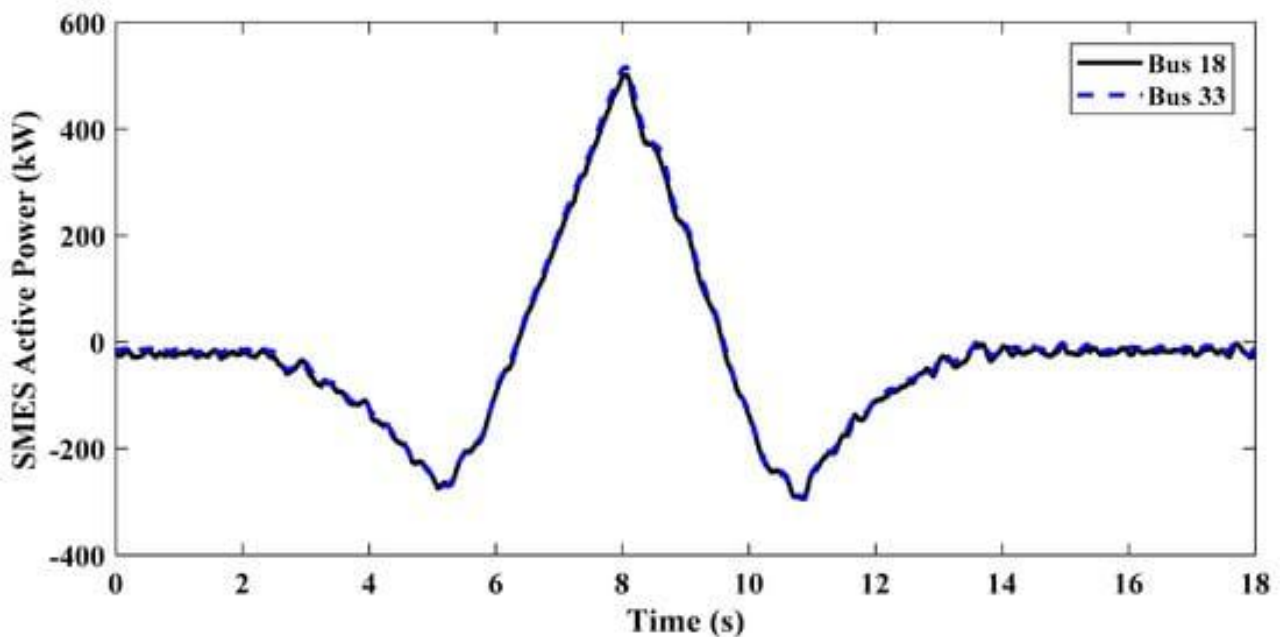


Рисунок 2.20. – Активна потужність SMES

За напругою керування здійснюється за допомогою ВКЗ на основі ПІ-регулятора. Покращена характеристика напруги трьох фаз. Це досягається завдяки тому, що реактивна потужність, що постачається мережею, зменшується, як показано на рисунку 2.21. Реактивна потужність, що вводиться з мережі, становить близько 3,7 МВАР, тоді як при використанні SMES реактивна потужність мережі досягає приблизно 0,8 МВАР. SMES

вводить реактивну потужність у мережу, як показано на рисунку 2.22, для покращення характеристики напруги, а зменшення реактивної потужності, що поглинається мережею, призводить до покращення коефіцієнта потужності. Енергія SMES і струм SMES відображені на рисунку 2.23 і 2.24 відповідно, які вказують на режим роботи SMES. Щоб підтвердити ефективність запропонованого методу керування, напруга шини постійного струму підтримується постійною під час поривів швидкості вітру, як показано на рисунку 2.25.

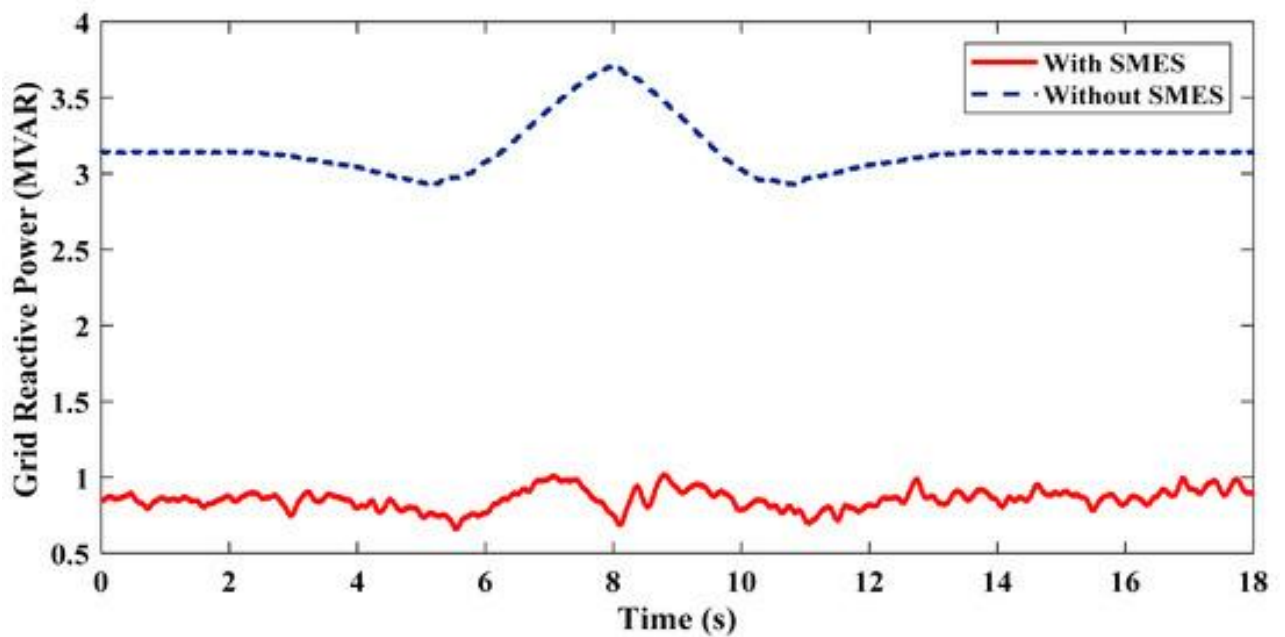


Рисунок 2.21. – Реактивна потужність мережі

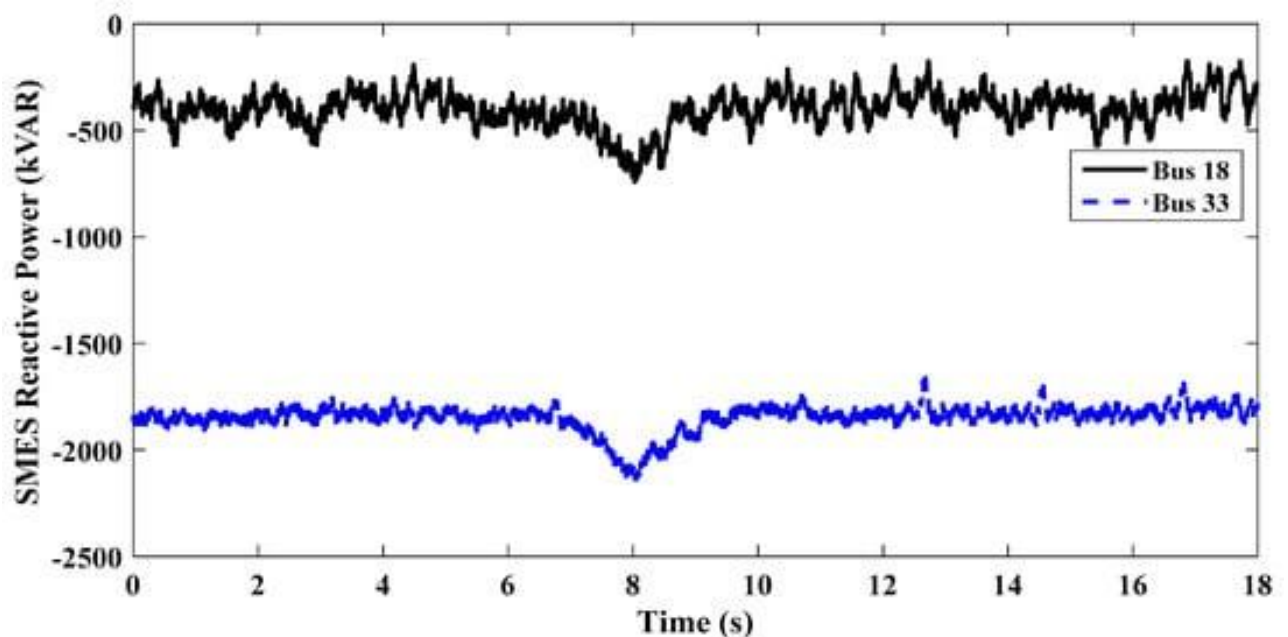


Рисунок 2.22. – Реактивна потужність SMES

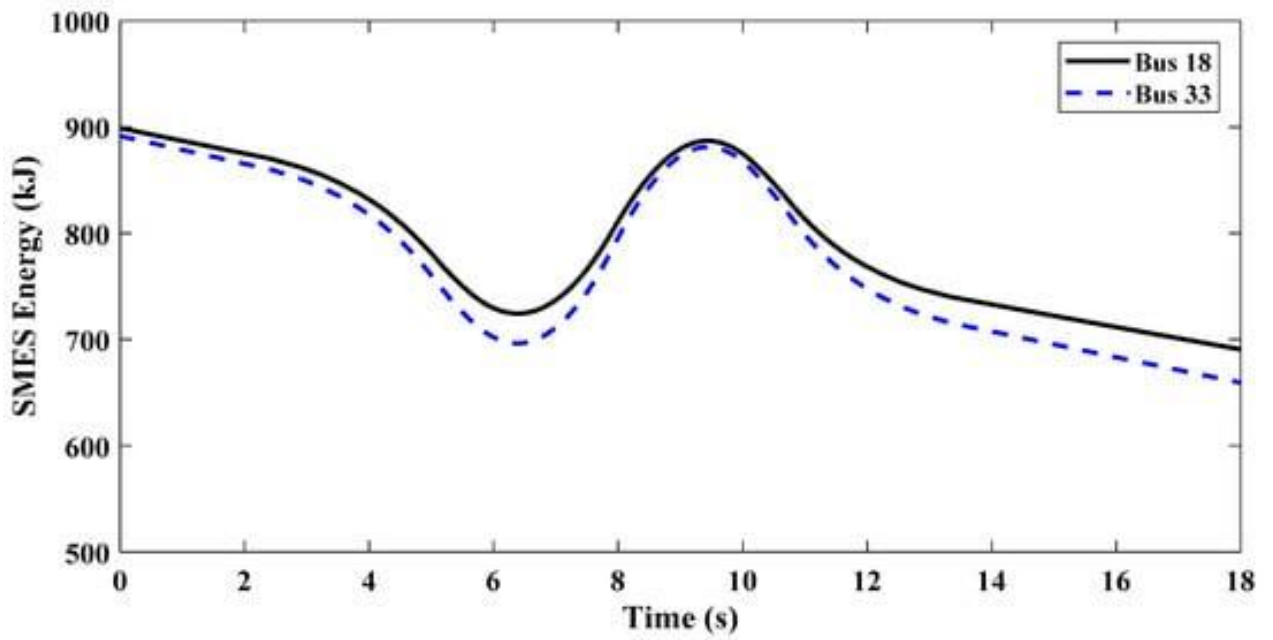


Рисунок 2.23. – Енергія SMES

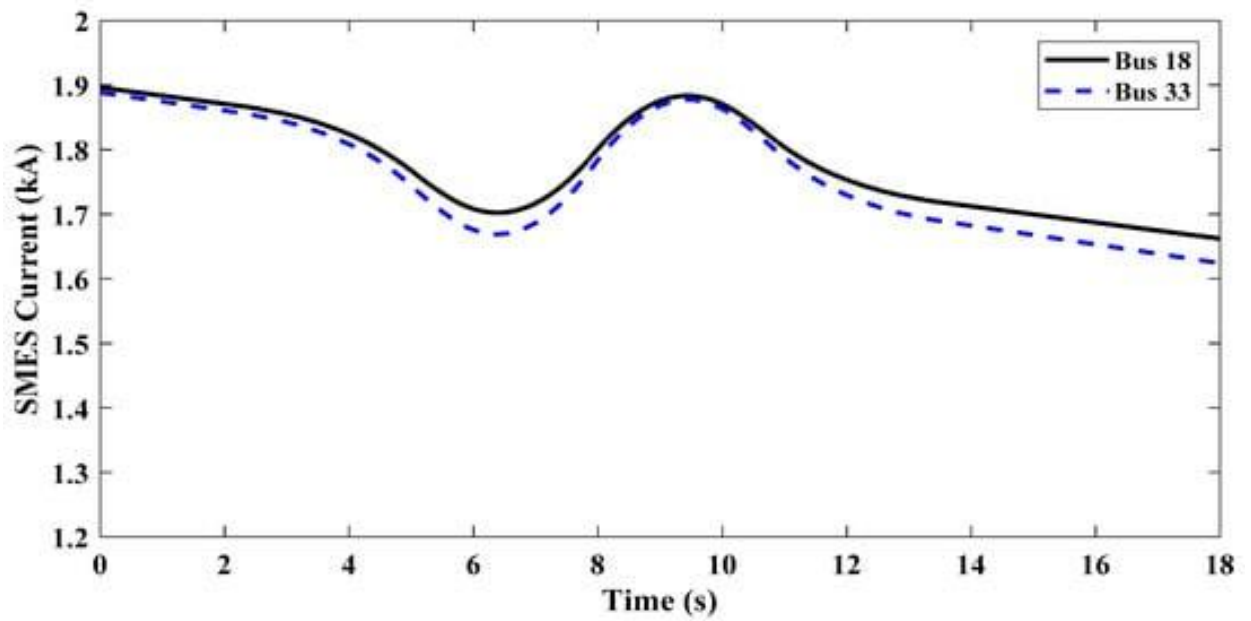


Рисунок 2.24. – Струм SMES

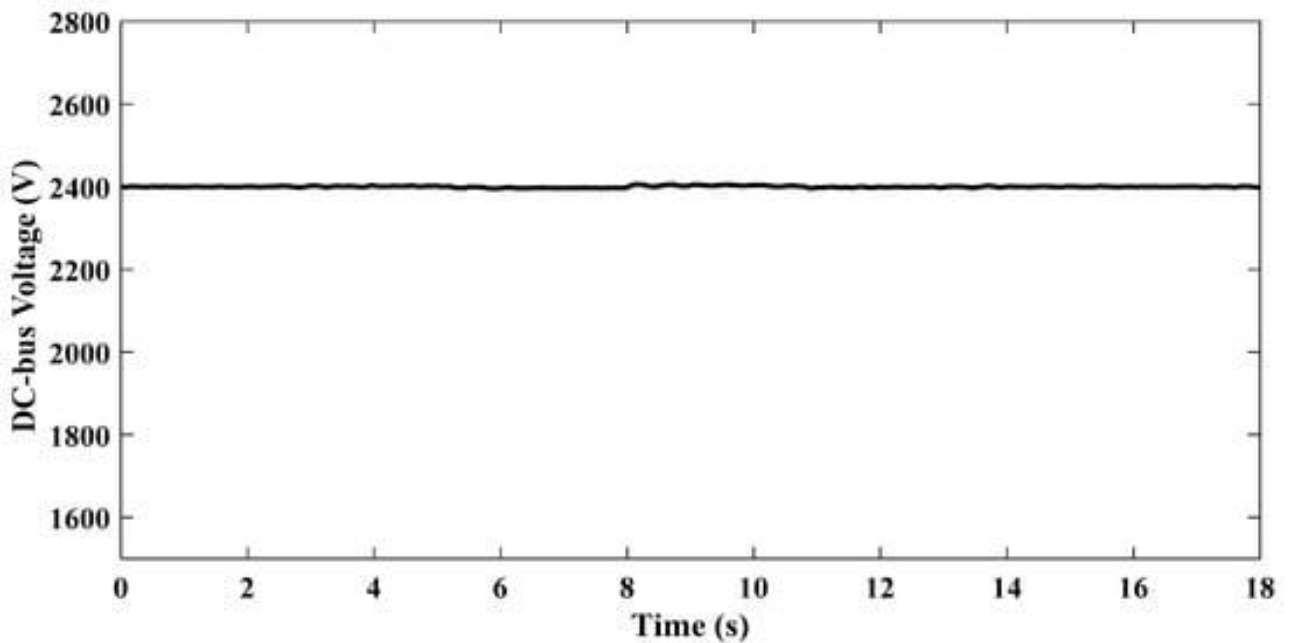


Рисунок 2.25. – Напруга шини постійного струму

Чисельні результати незбалансованого випадку з FLC-SMES і без нього наведено в таблиці 2.3. Тут контроль реактивної потужності на основі PI-VSC успішно забезпечує контроль і покращення напруги. Коли SMES увімкнено, максимальне та мінімальне значення реактивної потужності, що постачається мережею, мінімізується з 3,750 МВАР до 1,020 МВАР та з 2,950 МВАР до 0,670 МВАР, відповідно. Відповідно, незбалансовані трифазні напруги відчувають посилення; на шині 18 мінімальне значення напруги фази а, b і с покращується з 0,950 о.е., 0,920 о.е. і 0,890 о.е. до 1,019 о.е., 1,012 о.е. і 0,993 о.е., відповідно, коли SMES увімкнено. На шині 33 мінімальне значення напруги фази а, b і с покращується з 0,950 о.е., 0,927 о.е. і 0,890 о.е. до 1,017 о.е., 1,011 о.е. і 0,977 о.е., відповідно, коли SMES увімкнено. Перевищення і недорозвиток системної частоти зведені до мінімуму завдяки наявності системи SMES; крім того, частотні коливання зменшуються. Перевищення частоти зведено до мінімуму з 50,038 Гц (без SMES) до 50,005 Гц (з SMES). Недостаток зведено до мінімуму з 49,965 Гц (без SMES) до 50,00 Гц (з SMES). Це покращення частоти є результатом керування активною потужністю SMES, коли SMES вводить/поглинає активну потужність до/з мережі на основі

значення швидкості вітру порівняно з номінальною швидкістю вітру. Крім того, вирівнювання потужності досягається на основі FLC-SMES, де різниця між максимальним і мінімальним значенням активної потужності на шинах 18 і 33 і в мережі зменшується.

Таблиця 2.3. – Чисельні результати незбалансованого випадку

	Без МСП		З МСП	
	Максимум	мінімум	Максимум	мінімум
Напруга на шині 18 (pu), фаза a	0,990	0,950	1,036	1,019
Напруга на шині 18 (pu), фаза b	0,960	0,920	1,035	1,012
Напруга на шині 18 (pu), фаза c	0,920	0,890	1,007	0,993
Напруга на шині 33 (pu), фаза a	0,980	0,950	1,015	1,017
Напруга на шині 33 (pu), фаза b	0,953	0,927	1,014	1,011
Напруга на шині 33 (pu), фаза c	0,916	0,890	0,980	0,977
Частота (Гц)	50,038	49,965	50,005	50 000
Активна потужність при 18 (МВт)	0,650	0,250	0,420	0,390
Активна потужність при 33 (МВт)	0,650	0,250	0,420	0,390
Активна потужність мережі (МВт)	3,270	1,880	2,890	2,660
Реактивна потужність мережі (MVAR)	3,750	2,950	1,020	0,670

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У цьому дослідженні проаналізовано метод FLC-SMES для покращення продуктивності збалансованої та незбалансованої системи розподілу, підключеної до SCIG на базі вітру. Запропонований спосіб успішно пом'якшував коливання напруги та частоти під час пориву вітру. Крім того, запропонований метод досягає вирівнювання потужності для мережі та загальних шин (18 і 33). Крім того, для підтримки стабільності мережі було зменшено активну та реактивну потужності мережі. Система SMES має три режими роботи, де запропоноване керування може керувати SMES у режимі зарядки, режимі розрядки та режимі очікування відповідно до фактичної швидкості вітру та струму SMES. Можливим подальшим розширенням цієї моделі є вивчення гібридних систем накопичення енергії з ВДЕ та включення електричних транспортних засобів для досягнення управління енергією систем електроенергії. Основними обмеженнями запропонованої роботи є висока капітальна вартість системи SMES і збереження надпровідного стану котушки SMES.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

В дослідженні представлено ефективне рішення для подолання проблеми, спричиненої переривчастими джерелами енергії, які підключені до збалансованої/незбалансованої системи розподілу за допомогою системи надпровідного накопичення магнітної енергії (SMES), шляхом пом'якшення коливань напруги та частоти під час поривів вітру. Техніка нечіткої логіки керування (FLC) використовується з SMES для покращення напруги та частоти. В якості генератора енергії вітру використовується короткозамкнутий індукційний генератор (ККГ). Для перевірки запропонованого методу використовується система розподілу шин IEEE 33. Елементи 18-33 є найслабшими місцями в цій системі; таким чином, системи вітру та SMES підключені до системи на цих шинах. Ми використовували MATLAB/Simulink для моделювання продуктивності системи IEEE 33-bus (збалансована/незбалансована) з урахуванням SMES, вітрової системи та нечіткого логічного керування (FLC). Результати моделювання показують високу ефективність запропонованого методу керування для зменшення коливань напруги та частоти та досягнення стратегії вирівнювання потужності досліджуваної системи.

В рамках магістерської роботи показан загальний режим системи, представлена запропонована техніка керування SMES, представлені та проаналізовані результати моделювання.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України : Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування : аналіт. доп. / [Суходоля О. М., Харазішвілі Ю. М., Бобро Д. Г., Сменковський А. Ю., Рябцев Г. Л., Завгородня С. П.] ; за заг. ред. О. М. Суходолі. – Київ : НІСД, 2020. – 178 с..
3. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
4. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665-III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
8. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80> .

9. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021-2030 роки: Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
10. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
11. Renewables Global Status Report—REN21. 2020. Available online: https://www.ren21.net/reports/global-status-report/?gclid=Cj0KCQjwwuD7BRDBARIsAK_5YhUmsAuLdVfGwLa7hW6bd3_1oaBBaUdcPE9s9tQm6SAY0CWkk-nB1ZAaAlHREALw_wcB (accessed on 3 October 2020).
12. Eminoglu, U. A New Model for Wind Turbine Systems. *Electr. Power Components Syst.* 2009, 37, 1180–1193. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
13. Li, C.; University of Birmingham; Deng, J.; Zhang, X.-P. Coordinated design and application of robust damping controllers for shunt FACTS devices to enhance small-signal stability of large-scale power systems. *CSEE J. Power Energy Syst.* 2017, 3, 399–407. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
14. Wan, Y.; Murad, M.A.A.; Liu, M.; Milano, F. Voltage Frequency Control Using SVC Devices Coupled with Voltage Dependent Loads. *IEEE Trans. Power Syst.* 2018, 34, 1589–1597. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
15. Pereira, R.; Ferreira, C.M.M.; Barbosa, F.M. Comparative study of STATCOM and SVC performance on Dynamic Voltage Collapse of an Electric Power System with Wind Generation. *IEEE Lat. Am. Trans.* 2014, 12, 138–145. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
16. Kumar, H.; Dahiya, R. FACTS Device Control Strategy Using Optimal Number of PMU. In Proceedings of the International Conference on Advances in Electronics, Electrical & Computational Intelligence (ICAEEC), Prayagraj, India, 31 May–1 June 2019. [[Google Scholar](#)]

17. Li, C.; Disfani, V.R.; Pecenak, Z.K.; Mohajeryami, S.; Kleissl, J. Optimal OLTC voltage control scheme to enable high solar penetrations. *Electr. Power Syst. Res.* 2018, *160*, 318–326. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
18. Gu, M.; Meegahapola, L.G.; Wong, A.K.L. Coordinated Voltage and Frequency Control in Hybrid AC/MT-HVDC Power Grids for Stability Improvement. *IEEE Trans. Power Syst.* 2021, *36*, 635–647. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
19. Sanampudi, N.; Kanakasabapathy, P. Integrated voltage control and frequency regulation for stand-alone micro-hydro power plant. *Mater. Today Proc.* 2021. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
20. Babaei, M.; Muyeen, S.; Islam, S. Transiently stable intentional controlled islanding considering post-islanding voltage and frequency stability constraints. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2021, *127*, 106650. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
21. Haider, W.; Hassan, S.J.U.; Mehdi, A.; Hussain, A.; Adjayeng, G.O.M.; Kim, C.-H. Voltage Profile Enhancement and Loss Minimization Using Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation in Reconfigured Network. *Machines* 2021, *9*, 20. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
22. Shigenobu, R.; Nakadomari, A.; Hong, Y.-Y.; Mandal, P.; Takahashi, H.; Senjyu, T. Optimization of Voltage Unbalance Compensation by Smart Inverter. *Energies* 2020, *13*, 4623. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
23. Xu, H.; Wang, C.; Lu, C.; Lu, Z. An adaptive wind power smoothing method with energy storage system. *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.* 2014, 1–5. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
24. Shin, S.-S.; Oh, J.-S.; Jang, S.-H.; Cha, J.-H.; Kim, J.-E. Active and Reactive Power Control of ESS in Distribution System for Improvement of Power Smoothing Control. *J. Electr. Eng. Technol.* 2017, *12*, 1007–1015. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
25. Zhang, Y.; Srivastava, A. Voltage Control Strategy for Energy Storage System in Sustainable Distribution System Operation. *Energies* 2021, *14*, 832. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

26. Gong, K.; Shi, J.; Liu, Y.; Wang, Z.; Ren, L.; Zhang, Y. Application of SMES in the Microgrid Based on Fuzzy Control. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2016, 26, 1–5. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
27. Wang, Z.; Zou, Z.; Zheng, Y. Design and Control of a Photovoltaic Energy and SMES Hybrid System with Current-Source Grid Inverter. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2013, 23, 5701505. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
28. Hutchinson, A.; Gladwin, D.T. Optimisation of a wind power site through utilisation of flywheel energy storage technology. *Energy Rep.* 2020, 6, 259–265. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
29. Ruddell, A. Flywheel energy storage technologies for wind energy systems. In *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2010; pp. 366–392. [[Google Scholar](#)]
30. He, G.; Chen, Q.; Kang, C.; Xia, Q.; Poolla, K. Cooperation of Wind Power and Battery Storage to Provide Frequency Regulation in Power Markets. *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, 32, 3559–3568. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
31. Kang, B.-K.; Kim, S.-T.; Bae, S.-H.; Park, J.-W. Effect of a SMES in Power Distribution Network With PV System and PBEVs. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2013, 23, 5700104. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
32. Salama, H.; Vokony, I. Comparison of different electric vehicle integration approaches in presence of photovoltaic and superconducting magnetic energy storage systems. *J. Clean. Prod.* 2020, 260, 121099. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
33. Aly, M.M.; Salama, H.; Abdel-Akher, M. Power control of fluctuating wind/PV generations in an isolated Microgrid based on superconducting magnetic energy storage. In Proceedings of the 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 27–29 December 2016; pp. 419–424. [[Google Scholar](#)]
34. Salama, H.S.; Said, S.M.; Vokony, I.; Hartmann, B. Adaptive Coordination Strategy Based on Fuzzy Control for Electric Vehicles and Superconducting

- Magnetic Energy Storage—Towards Reliably Operating Utility Grids. *IEEE Access* 2021, 9, 61662–61670. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
35. Yang, B.; Wang, J.; Zhang, X.; Yu, L.; Shu, H.; Yu, T.; Sun, L. Control of SMES systems in distribution networks with renewable energy integration: A perturbation estimation approach. *Energy* 2020, 202, 117753. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 36. Kumar, G.S.; Selvi, V.A.I.; Pandiyan, K. Design and analysis of ML-VSC based SMES with improved power quality features. *Mater. Today Proc.* 2021. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 37. Salama, H.; Vokony, I.; Zobair, M.; Aly, M.M. Amelioration the Stability of Power System Coupled with SCIG and PMSG Using Controlled-SMES. In Proceedings of the 2020 International Conference on Innovative Trends in Communication and Computer Engineering (ITCE), Aswan, Egypt, 8–9 February 2020; pp. 346–351. [[Google Scholar](#)]
 38. Salama, H.S.; Vokony, I. Power Stability Enhancement of SCIG and DFIG Based Wind Turbine Using Controlled-SMES. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2019, 9, 147–156. [[Google Scholar](#)]
 39. Mateev, V.; Ivanov, G.; Marinova, I. Comparison of Electromagnetic Formulations for Multilayer HTS Power Cable Modeling. In Proceedings of the 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 3–6 June 2020; pp. 1–4. [[Google Scholar](#)]
 40. Mir, A.S.; Senroy, N. Adaptive Model Predictive Control Scheme for Application of SMES for Load Frequency Control. *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, 1. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 41. Xian, W.; Yuan, W.; Yan, Y.; Coombs, T.A. Minimize frequency fluctuations of isolated power system with wind farm by using superconducting magnetic energy storage. In Proceedings of the 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Taipei, Taiwan, 2–5 November 2009; pp. 1329–1332. [[Google Scholar](#)]

42. Krishnamurthy, V.; Kumar, C.R. Constant Power Control Of 15 DFIG Wind Turbines with Superconducting Magnetic Energy Storage System. *Int. J. Eng. Trends Technol.* 2013, *4*, 4193–4200. [[Google Scholar](#)]
43. Ali, M.H.; Park, M.; Yu, I.-K.; Murata, T.; Tamura, J. Improvement of Wind-Generator Stability by Fuzzy-Logic-Controlled SMES. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2009, *45*, 1045–1051. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
44. Ali, M.H.; Park, M.; Yu, I.-K.; Murata, T.; Tamura, J.; Wu, B. Enhancement of transient stability by fuzzy logic-controlled SMES considering communication delay. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2009, *31*, 402–408. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
45. Ozmetin, A.E.; Rathnayaka, K.D.D.; Naugle, D.G.; Lyuksyutov, I.F. Strong increase in critical field and current in magnet-superconductor hybrids. *J. Appl. Phys.* 2009, *105*, 07E324. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
46. Tsuchiya, K.; Kikuchi, A.; Terashima, A.; Norimoto, K.; Uchida, M.; Tawada, M.; Masuzawa, M.; Ohuchi, N.; Wang, X.; Takao, T.; et al. Critical current measurement of commercial REBCO conductors at 4.2 K. *Cryogenics* 2017, *85*, 1–7. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
47. Amaro, N.; Pina, J.M.; Martins, J.; Ceballos, J.M. *A Study on Superconducting Coils for Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Applications*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; pp. 449–456. [[Google Scholar](#)]
48. Glatz, A.; Sadovskyy, I.A.; Welp, U.; Kwok, W.-K.; Crabtree, G.W. The Quest for High Critical Current in Applied High-Temperature Superconductors. *J. Supercond. Nov. Magn.* 2019, *33*, 127–141. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
49. Skiba, B.; Tomkow, L.; Kulikov, E.; Drobin, V.; Malecha, Z. Experimental and numerical analysis of faulty operation of a superconducting solenoid made of tape with high temperature superconductor. *AIP Conf. Proc.* 2019, *2163*, 20004. [[Google Scholar](#)]

50. Rupa, J.; Ganesh, S. Power Flow Analysis for Radial Distribution System Using Backward/Forward Sweep Method. *Int. J. Electr. Comput. Electron. Commun. Eng.* 2014, 8, 1540–1544. [[Google Scholar](#)]
51. Venkatesh, B.; Chandramohan, S.; Kayalvizhi, N.; Devi, R.K. Optimal reconfiguration of radial distribuion system using artificial intelligence methods. In Proceedings of the 2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH), Toronto, ON, Canada, 26–27 September 2009; pp. 660–665. [[Google Scholar](#)]
52. Firouzi, M.; Gharehpetian, G.B.; Mozafari, S.B. Application of UIPC to improve power system stability and LVRT capability of SCIG-based wind farms. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2017, 11, 2314–2322. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
53. Salama, H.S.; Said, S.M.; Aly, M.; Vokony, I.; Hartmann, B. Studying Impacts of Electric Vehicle Functionalities in Wind Energy-Powered Utility Grids With Energy Storage Device. *IEEE Access* 2021, 9, 45754–45769. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
54. Heier, S. *Grid Integration of Wind Energy*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2014. [[Google Scholar](#)]
55. Tan, S.; Geng, H.; Yang, G.; Wang, H.; Blaabjerg, F. Modeling framework of voltage-source converters based on equivalence with synchronous generator. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2018, 6, 1291–1305. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
56. Segundo, J.; Peña-Gallardo, R.; Medina, A.; Núñez-Gutiérrez, C.; Visairo-Cruz, N. A Comprehensive Modeling of a Three-Phase Voltage Source PWM Converter. *Math. Probl. Eng.* 2015, 2015, 1–11. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]