

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.316.003.13:621.311.243:004.9

ПОГОДЖЕНО

**Директор Навчально-наукового
інституту енергетики, автоматики
і енергозбереження**
(назва ННІ)

_____ Каплун В.В.
(підпис) (ПІБ)

“ ___ ” _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**Завідувач кафедри
інженерії енергосистем**
(назва кафедри)

_____ Антипов Є.О.
(підпис) (ПІБ)

“ ___ ” _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «Обґрунтування технічних рішень при проектуванні цифрових
підстанцій на прикладі навчального полігону кафедри інженерії
енергосистем НУБІП України»**

Спеціальність 141. «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми **освітньо-наукова**
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Кривонос В.Є.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

ак., д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Бабак В.П.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Мартинюк О.В.
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

інженерії енергосистем
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ Є. О. Антипов
(підпис)

»_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

Мартинюку Олексію Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Обґрунтування технічних рішень при проектуванні цифрових підстанцій на прикладі навчального полігону кафедри інженерії енергосистем НУБіП України»

затверджена наказом проректора НУБіП України від «26» 09 2024 р. № 1665 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:

план-розріз підстанції навчального полігону кафедри електропостачання НУБіП України, перелік обладнання.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз сучасного стану та перспектив впровадження цифрових підстанцій в електроенергетичних системах.

2. Обґрунтування технічних та функціональних рішень цифрової підстанції на основі навчального полігону кафедри інженерії енергосистем НУБіП України.

3. Розробка сценарію інтеграції накопичувача енергії та відновлюваних джерел до цифрової підстанції з урахуванням ролі системи управління енергією (EMS).

4. Оцінка ефективності та функціональних можливостей цифрової підстанції при реалізації автоматизованого керування, резервування живлення та балансування енергетичних потоків.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання «_____» _____ 20__ р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(підпис)

Бабак В.П.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Мартинюк О.В.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» виконаний у Національному університеті біоресурсів і природокористування України, Київ, 2025 р.

Метою магістерської роботи є обґрунтування технічних рішень при проектуванні цифрової підстанції з використанням елементів реального обладнання навчального полігону кафедри інженерії енергосистем НУБіП України. Робота спрямована на аналіз переваг цифровізації енергетичних об'єктів, дослідження архітектури, засобів автоматизації та особливостей впровадження інтелектуальних технологій керування та захисту в сучасних розподілених електричних мережах.

Об'єктом дослідження є цифрова підстанція на основі навчального полігону з інтегрованими установками відновлюваних джерел енергії та системою накопичення енергії.

Предметом дослідження є технічні рішення щодо архітектури цифрової підстанції, можливості інтеграції розподіленої генерації, накопичувачів енергії, а також застосування сучасних технологій автоматизованого керування, моніторингу та обробки даних у цифровому середовищі.

У роботі виконано аналіз сучасного стану цифрових підстанцій, розглянуто нормативні підходи та перспективні напрями розвитку. Здійснено детальний технічний аналіз обладнання навчального полігону, сформовано схему його інтеграції в цифрову систему з урахуванням специфіки діючої інфраструктури. Розроблено структуру енергосистеми з можливістю підключення накопичувача енергії та сонячної генерації, а також запропоновано рішення щодо застосування системи керування енергією (EMS).

Робота включає такі етапи:

- аналіз літературних джерел та стандартів з цифрових підстанцій;
розгляд архітектури цифрової підстанції із застосуванням IED-пристроїв,
технологій IEC 61850 та SCADA/EMS;
- проєктування схеми підстанції навчального полігону з урахуванням
резервування живлення та автоматизованого управління;
- формування технічних рішень щодо підвищення надійності,
адаптивності та ефективності роботи підстанції;
- оцінка потенційної ефективності запропонованої архітектури в умовах
сучасних енергетичних викликів.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОЄКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ПІДСТАНЦІЙ	9
1.1 Основні принципи цифрових підстанцій	9
1.2 Порівняння традиційних і цифрових підстанцій	11
1.3. Висновок до розділу 1.....	18
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	19
2.1. Огляд концепцій цифрових підстанцій та їх переваг.....	19
2.2. Стандартизація цифрових технологій (IEC 61850, IEEE 1588).....	24
2.3. Висновок до розділу 2.....	32
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРАЦІЇ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ В СЕРЕДОВИЩІ ЦИФРОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ.....	33
3.1. Вибір сценарію інтеграції УЗЕ в структуру цифрової підстанції	33
3.2. Обґрунтування технічних параметрів системи LUNA2000.....	36
3.3. Оцінка впливу інтеграції УЗЕ на надійність та енергоефективність підстанції.....	40
3.4. Висновок до розділу 3.....	45
РОЗДІЛ 4. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ.....	47
4.1. Вплив цифровізації на зниження енергоспоживання.....	47
4.2. Аналіз резервування системи живлення	51
4.3. Роль УЗЕ в цифровій підстанції та оптимізація навантажень.....	62
4.4. Висновок до розділу 4	72
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ПЛЕП - повітряна лінія електропередач;
- КТП - комплектна трансформаторна підстанція;
- ПУЕ - правила улаштування електроустановок;
- РП - розподільний пристрій;
- КРУН - комплектна розподільча установка;
- IED -(intelligent electronic device) інтелектуальний електронний пристрій;
- GOOSE - (Generic Object-Oriented Substation Event) Загальні об'єктно-орієнтовані події підстанції;
- SMV - (Sampled Measured Values) Протокол вибіркових вимірюваних значень IEC 61850;
- EMS - (Energy Management System) система енергоменеджменту;
- УЗЕ - установка збереження енергії;
- ВДЕ - відновлювані джерела енергії;
- СЕС - сонячна електростанція.

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку енергетичних систем особливу увагу приділено впровадженню цифрових технологій, які забезпечують підвищення ефективності, надійності та безпеки роботи енергетичних об'єктів. Одним із ключових напрямків розвитку є створення цифрових підстанцій, що дозволяють здійснювати автоматизований контроль, діагностику та управління енергетичними процесами в режимі реального часу. Це сприяє більшій адаптивності електромереж до зміни навантаження, зменшення технологічних втрат та покращення.

Цифрові підстанції базуються на використанні інтелектуальних електронних пристроїв (IED), сучасних систем релейного захисту та автоматики, а також цифрових протоколів обміну даними відповідно до міжнародних стандартів, зокрема IEC 61850. Використання цих технологій дозволяє мінімізувати фізичні з'єднання, зменшити кількість вторинних комутацій[1].

Важливим аспектом дослідження цифрових підстанцій є аналіз їх впливу на ключові параметри енергосистеми, такі як коефіцієнти потужності, стабільність роботи мережі та ефективність роботи системи захисту. Для проведення подібних досліджень широко використовують спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє моделювати та аналізувати роботу енергетичних об'єктів у різних режимах експлуатації. Завдяки моделюванню можна оцінити, як змінюється поведінка системи при різних навантаженнях, аваріях та зміні параметрів керування, що дозволяє оптимально підняти роботу ще на етапі проекту.

Актуальність теми обумовлена забезпеченням підвищення рівня автоматизації та цифровізації електроенергетичних систем, що відповідає загальносвітовим тенденціям розвитку галузі. Впровадження цифрових

підстанцій дозволяє суттєво зменшити експлуатаційні витрати, підвищити оперативність прийнятих рішень та покращити безпеку енергопостачання. Крім того, цифрові підстанції є кроком у розвиток концепції Smart Grid, яка передбачає створення гнучкої, інтелектуальної та саморегульованої енергетичної системи, здатної інтегрувати відновлені джерела енергії, зменшуючи негативний вплив на довкілля.

Зважаючи на вимоги зростання до надійності та ефективності енергетичних систем, питання впровадження цифрових технологій у підстанціях набуває особливого значення. Дослідження цього напрямку дозволяє не тільки підвищити якість електропостачання, але й розробити рекомендації щодо оптимального впровадження цифрових рішень, які сприяють підвищенню енергоефективності, надійності та безпеки роботи енергетичних систем.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОЄКТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

1.1. Основні принципи цифрових підстанцій

Стандарт IEC 61850 є основою цифрових підстанцій, що забезпечує уніфіковану систему комунікації між інтелектуальними електронними пристроями (IED). Його використання сприяє взаємодії обладнання різних виробників, спрощенню проєктування та оптимізації процесів експлуатації. IEC 61850 дозволяє реалізувати технології моніторингу в реальному часі, що підвищує оперативність прийняття рішень і знижує витрати на обслуговування[2][6].

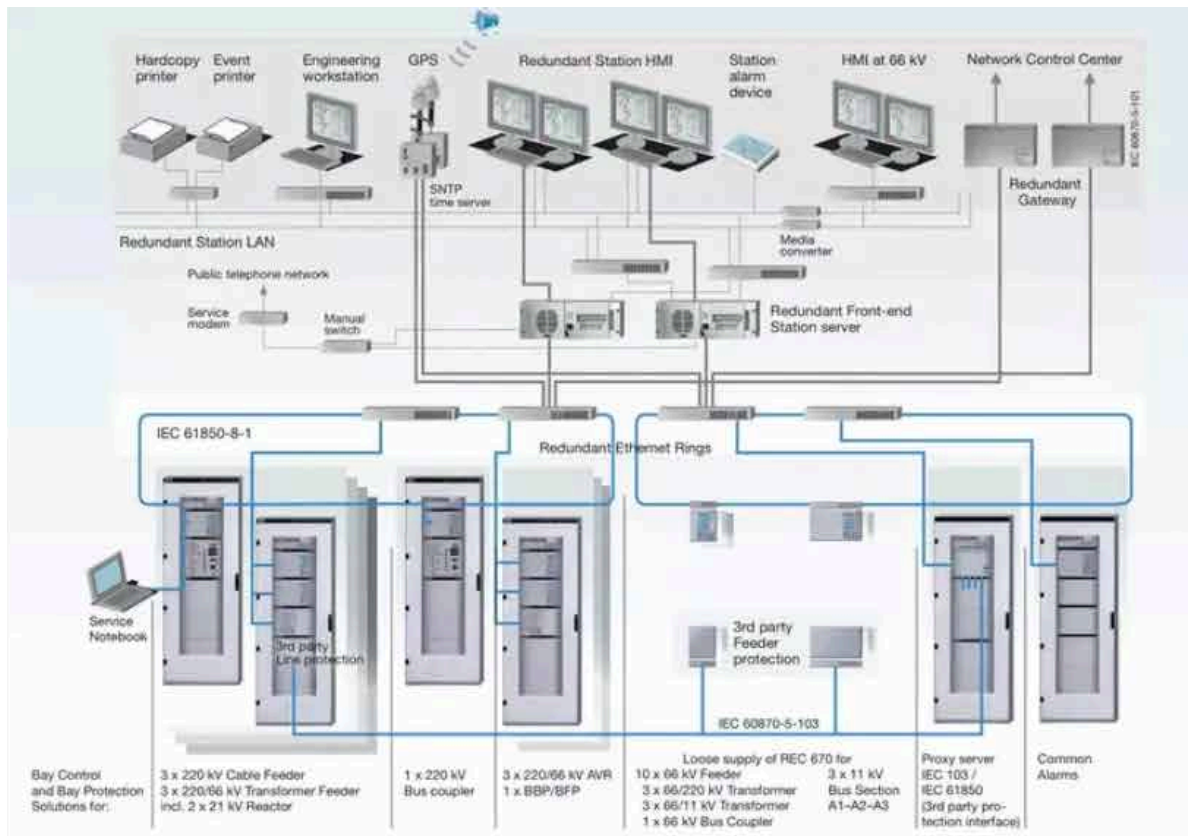


Рис.1.1. Топологія підстанції сумісна з IEC 61850

Однією з головних особливостей IEC 61850 є можливість використання специфічних протоколів зв'язку, таких як GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event) та SMV (Sampled Measured Values), які забезпечують швидку і надійну передачу даних між пристроями підстанції. Впровадження цих технологій дозволяє значно скоротити час реакції системи на зміну умов експлуатації.



Рис.1.2. Еволюція цифрової підстанції[4]

1.2. Порівняння традиційних і цифрових підстанцій

Основні компоненти цифрових підстанцій

Цифрові підстанції складаються з кількох ключових елементів, які сприяють ефективному управлінню розподілом електроенергії. До основних компонентів належать:

- Інтелектуальні електронні пристрої (IED), які відповідають за захист, контроль і управління підстанцією.
- Комунікаційні мережі, що забезпечують обмін інформацією між компонентами системи за допомогою протоколів IEC 61850.
- Шина процесу (Process Bus), яка дозволяє передавати цифрові вимірювані значення безпосередньо до релейного захисту і автоматики.
- Системи моніторингу, які включають датчики, SCADA-системи та аналітичні інструменти для оцінки стану обладнання.

Автоматизація та кібербезпека

Автоматизація цифрових підстанцій забезпечує суттєве зменшення часу реагування на аварійні ситуації та підвищення ефективності роботи. Інтеграція систем предиктивного обслуговування на основі аналізу великих даних дозволяє виявляти потенційні відмови ще до їх виникнення, що сприяє оптимізації експлуатаційних витрат.

З іншого боку, цифровізація несе загрозу кібератак, що потребує впровадження додаткових заходів безпеки. IEC 61850 Edition 2.1 містить розширені механізми захисту даних, такі як автентифікація пристроїв та шифрування комунікацій. Крім того, реалізація політик доступу до мережевих ресурсів та безперервний моніторинг підвищують рівень безпеки цифрових підстанцій[5].

Виклики впровадження цифрових підстанцій

Незважаючи на переваги цифрових підстанцій, їхнє впровадження стикається з низкою труднощів. Основні виклики включають:

-Міграція від застарілих систем. Багато традиційних підстанцій використовують аналогові технології, тому їх адаптація до цифрових рішень вимагає значних інвестицій.

-Необхідність підготовки персоналу. Робота з цифровими системами потребує нових компетенцій, що вимагає навчання персоналу та оновлення методик експлуатації.

-Забезпечення сумісності обладнання. Впровадження цифрових технологій вимагає узгодження різних апаратних і програмних рішень між собою[6].

Порівняння традиційних і цифрових підстанцій підкреслює значну еволюцію в технології та практиці експлуатації в системах розподілу електроенергії. Традиційні підстанції, які вже давно є невід'ємною частиною передачі та розподілу електроенергії, покладаються на аналогові технології та ручні операції для керування перетворенням напруги та забезпечення надійності доставки електроенергії. Їх можна розділити на різні типи, включаючи передавальні, розподільні, колекторні та комутаційні підстанції, кожна з яких виконує окремі функції в електричній мережі. Однак зростаюча складність і вимоги до сучасних енергетичних систем викликали необхідність удосконалення дизайну та експлуатації підстанцій, що призвело до появи цифрових підстанцій. Цифрові підстанції використовують інтелектуальні електронні пристрої (IED), зв'язок на основі Ethernet і розширену аналітику даних для підвищення автоматизації та ефективності роботи[7].

На відміну від своїх традиційних аналогів, цифрові підстанції характеризуються здатністю обробляти дані в режимі реального часу, оптимізувати роботу та зменшувати фізичну інфраструктуру, необхідну для ефективного керування енергопостачанням[8].

Примітно, що перехід від традиційних до цифрових підстанцій дає кілька переваг, включаючи підвищену надійність, зниження експлуатаційних

витрат і посилені заходи безпеки. Цифрові підстанції потребують менше фізичного простору та використовують нетрадиційні технології вимірювання, що призводить до економії коштів та ефективності роботи. Крім того, очікується, що нові технології, такі як штучний інтелект і моделі цифрових двійників, революціонізують роботу та технічне обслуговування цих систем, сприяючи проактивному управлінню активами та скороченню часу простою. Незважаючи на переваги, перехід до цифрових підстанцій не обійшовся без суперечок, особливо щодо початкових витрат, пов'язаних з модернізацією існуючої інфраструктури, і проблем інтеграції нових технологій у встановлені системи. Оскільки енергетичний ландшафт розвивається зі збільшенням акценту на стійкості та відновлюваних джерелах енергії, дебати навколо темпів і масштабів впровадження цифрових технологій на підстанціях залишаються критичним аспектом дискурсу в секторі електроенергетики.

Традиційні підстанції

Традиційні підстанції є важливими компонентами мережі розподілу електроенергії, призначені для перетворення та керування потоком електроенергії між точками генерації та споживачами. Ці підстанції можна класифікувати на основі їх функцій, планування та конфігурації.

Типи традиційних підстанцій:

Підстанції передачі, як правило, розташовані в мережі електропередач і виконують критичну функцію з'єднання двох або більше ліній електропередач високої напруги. Вони стратегічно розташовані на периферії населених пунктів для керування високовольним обладнанням. Основна роль підстанцій передачі - підвищувати напругу для передачі на великі відстані або знижувати напругу для подальшого розподілу, використовуючи трансформатори для цього перетворення напруги.

Розподільчі підстанції частіше зустрічаються в місцевих районах і мають завдання знижувати напругу до рівня, безпечного для розповсюдження

житловим і комерційним споживачам. Вони відіграють важливу роль у забезпеченні того, щоб електроенергія, що постачається кінцевим споживачам, була стабільною та відповідала стандартам безпеки.

Колекторні підстанції агрегують електроенергію від кількох джерел генерації, таких як теплові електростанції, гідроелектростанції або вітряні електростанції, перед тим, як передавати її до єдиного блоку електропередачі. Цей тип підстанції має вирішальне значення для управління різними надходженнями енергії в енергомережу.

Підвищувальні підстанції розташовані поблизу об'єктів виробництва електроенергії, де вони підвищують напругу для ефективної передачі на великі відстані. І навпаки, *знижувальні підстанції*, розташовані ближче до населених пунктів, знижують напругу до безпечного рівня для розподілу споживачів. В обох типах для регулювання напруги використовуються силові трансформатори.

Конфігурації збірних шин

Збірні шини на традиційних підстанціях можуть мати різні конфігурації, такі як одна шина, подвійна шина та кільцеві шини. Кожна схема пропонує різні рівні резервування, гнучкості та простоти обслуговування. Наприклад, система подвійної шини підвищує надійність, дозволяючи одній шині залишатися в робочому стані, поки інша проходить технічне обслуговування.

Ключові компоненти традиційних підстанцій

Традиційні підстанції включають кілька важливих компонентів для забезпечення ефективної роботи:

- трансформатори: вони мають вирішальне значення для підвищення або зниження рівня напруги за потреби;

- шинопроводи: ці провідники забезпечують кілька з'єднань і полегшують потік електроенергії всередині підстанції;

-автоматичні вимикачі: вони захищають електричну систему, перериваючи потік під час несправностей, забезпечуючи безпеку та надійність доставки електроенергії;

-блискавкозрядники та пристрої захисту від перенапруг: ці компоненти захищають від стрибків струму, викликаних ударами блискавки або перемиканнями, захищаючи чутливе обладнання всередині підстанції.

Цифрові підстанції

Цифрові підстанції представляють значну еволюцію в проектуванні та експлуатації систем розподілу електроенергії, що характеризується інтеграцією інтелектуальних електронних пристроїв (IED) і передових цифрових комунікаційних технологій. На відміну від традиційних підстанцій, які покладаються на аналогові системи та ручні операції, цифрові підстанції використовують мережу IED, зв'язок на основі Ethernet та аналіз даних у реальному часі для підвищення автоматизації та ефективності роботи.

Огляд інтелектуальних електронних пристроїв (IED)

IED є основними компонентами цифрових підстанцій, які виконують важливі функції, такі як захист, контроль і моніторинг. Ці пристрої включають цифрові реле, інтелектуальні лічильники, регулятори напруги та контролери відсіків, усі вони оснащені мікропроцесорами та можливостями зв'язку, які дозволяють їм безперервно контролювати електричні параметри та спілкуватися з системами диспетчерського керування та збору даних (SCADA). Цифрові реле, наприклад, забезпечують захист електрообладнання шляхом виявлення несправностей та ізоляції пошкоджених ланцюгів.

Стандарти зв'язку

Центральним для роботи цифрових підстанцій є стандарт IEC 61850, встановлений Міжнародною електротехнічною комісією. Цей стандарт регулює комунікаційні мережі та системи на підстанціях і служить основою для цифрового зв'язку та автоматизації розподілу електроенергії.

Використовуючи стандартизовані протоколи зв'язку, цифрові підстанції забезпечують взаємодію між пристроями різних виробників, сприяючи більш плавній та ефективній інтеграції технологій.

Переваги перед традиційними підстанціями

Цифрові підстанції пропонують ряд переваг порівняно з традиційними аналогами. Їм потрібно менше фізичного простору через меншу залежність від мідних кабелів і звичайного обладнання, що призводить до економії коштів на інфраструктуру. Використання нетрадиційних вимірювальних трансформаторів (NCIT) і вдосконаленої вимірювальної інфраструктури (AMI) додатково підвищує ефективність роботи, забезпечуючи компактні конструкції та покращені можливості збору даних. Крім того, цифрові підстанції забезпечують широкі можливості збору даних і самоконтролю, що дозволяє підвищити надійність і продуктивність. Сигнали вимірювань у режимі реального часу та інформація про стан можуть передаватися по всій підстанції через оптичний зв'язок, усуваючи потребу в складній і дорогій проводці «точка-точка». Ця можливість не тільки спрощує установку, але й підвищує швидкість реагування системи розподілу електроенергії.

Новітні технології

Інтеграція технології цифрових близнюків і штучного інтелекту (ШІ) готується зробити революцію в експлуатації та обслуговуванні цифрових підстанцій. Цифрові двійники служать віртуальними копіями фізичних підстанцій, забезпечуючи моніторинг у реальному часі та прогнозне обслуговування. Алгоритми штучного інтелекту можуть аналізувати дані датчиків, щоб виявляти аномалії та оптимізувати роботу, покращуючи управління активами та скорочуючи час простою.

Порівняння традиційних і цифрових підстанцій

Цифрові підстанції представляють собою значний прогрес у технології підстанцій, використовуючи передові цифрові технології для покращення

роботи та ефективності систем розподілу електроенергії. На відміну від традиційних підстанцій, які переважно покладаються на аналогову технологію та ручне керування, цифрові підстанції використовують інтелектуальні електронні пристрої (IED), мережі зв'язку на базі Ethernet та аналітику даних у реальному часі для покращення функціональності та продуктивності.

Ключові відмінності

Технології та інфраструктура

Традиційні підстанції значною мірою залежать від мідної проводки та звичайних вимірювальних трансформаторів для підключення та передачі даних. Ці підстанції потребують розгалуженої фізичної інфраструктури, обслуговування якої може бути складним і дорогим. Навпаки, цифрові підстанції використовують цифрові шини процесу, визначені стандартом ІЕС 61850, що забезпечує оптичний зв'язок, що усуває потребу в мідних з'єднаннях «точка-точка». Ця зміна не тільки зменшує складність монтажу, але й покращує надійність і ефективність передачі даних всередині підстанції.

Обробка даних і автоматизація

Хоча традиційні підстанції включають деякі цифрові технології, вони не повністю використовують переваги інтегрованих систем зв'язку. Цифрові підстанції, з іншого боку, розроблені для полегшення обміну даними в реальному часі між пристроями, що призводить до швидшого часу відгуку та більш ефективного використання активів. Використання передових методів збору даних і прогнозованого технічного обслуговування на цифрових підстанціях дозволяє здійснювати безперервний моніторинг продуктивності обладнання, допомагаючи визначити області для вдосконалення та скоротити незаплановані простой.

Операційна ефективність

Цифрові підстанції розроблені для оптимізації як капітальних (Capex), так і операційних (Opex) витрат, забезпечуючи економічно ефективну роботу

протягом усього життєвого циклу. Використовуючи передові вторинні технології та компоненти автоматизації, цифрові підстанції не тільки підвищують ефективність роботи, але й підвищують безпеку системи порівняно зі своїми традиційними аналогами. Це збільшення ефективності має вирішальне значення в сучасному енергетичному ландшафті, де реагування на зовнішні події та загальна стійкість мережі мають першочергове значення.

1.3. Висновок до розділу 1

Стандарт IEC 61850 є фундаментом для реалізації цифрових підстанцій, оскільки забезпечує уніфіковану платформу для обміну даними між інтелектуальними пристроями, що підвищує сумісність обладнання та ефективність управління енергосистемою. Цифрові підстанції, у порівнянні з традиційними, характеризуються високим рівнем автоматизації, швидкою реакцією на аварійні ситуації, зменшенням витрат на інфраструктуру та експлуатацію. Водночас їх впровадження супроводжується викликами, зокрема у сфері кібербезпеки, модернізації застарілих систем та підготовки персоналу. Проте переваги цифровізації, зокрема можливості моніторингу в реальному часі, впровадження прогнозного обслуговування та гнучкості до інтеграції нових технологій, роблять цифрові підстанції перспективним напрямом розвитку сучасної енергетики.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1. Огляд концепцій цифрових підстанцій та їх переваг

Цифрові підстанції представляють собою ключовий елемент сучасної енергетичної інфраструктури, спрямований на підвищення ефективності, надійності та безпеки електропостачання. Вони використовують сучасні інформаційні технології, включаючи інтелектуальні електронні пристрої (IED), цифрові системи захисту та автоматизації, а також стандартизовані комунікаційні протоколи. Ці технології сприяють не лише оперативному контролю параметрів електроенергетичної системи, а й реалізації функцій прогнозного обслуговування та віддаленого управління[9].

Однією з визначальних особливостей цифрових підстанцій є перехід від традиційної аналогової комунікації до повністю цифрових каналів зв'язку. Це дозволяє значно зменшити кількість мідних з'єднань, підвищити точність передачі даних та забезпечити кращу гнучкість в управлінні мережею. Крім того, цифрові підстанції мають покращену модульну структуру, що дозволяє легко інтегрувати нові компоненти без значного перегляду всієї системи.

Важливим аспектом цифрових підстанцій є можливість інтеграції технологій штучного інтелекту та великих даних. Аналітичні платформи дозволяють виявляти аномалії в роботі обладнання, аналізувати історичні дані та прогнозувати можливі несправності ще до їх виникнення. Це суттєво зменшує витрати на технічне обслуговування та покращує загальну стійкість системи.

Іншим значущим напрямком розвитку цифрових підстанцій є їхня інтеграція в концепцію Smart Grid. Це передбачає створення розумних мереж, які здатні адаптуватися до змін навантаження, регулювати потоки електроенергії у реальному часі та автоматично балансувати енергетичну систему. Поєднання цифрових підстанцій із технологіями розподіленої генерації, зокрема відновлюваних джерел енергії, відкриває нові можливості

для підвищення гнучкості та екологічної стійкості електроенергетичних мереж.

Одним із важливих викликів у впровадженні цифрових підстанцій є забезпечення їх кібербезпеки. Оскільки такі системи ґрунтуються на постійному обміні даними через мережі зв'язку, вони можуть стати потенційною мішенню для кібератак. Впровадження сучасних механізмів захисту, включаючи шифрування даних, багаторівневу аутентифікацію та системи моніторингу мережевого трафіку, є критично важливим для надійної роботи цифрових підстанцій.

Перехід до цифрових підстанцій також вимагає відповідної підготовки персоналу. Використання нових технологій потребує не лише знання традиційних принципів роботи електроенергетичних систем, а й розуміння особливостей цифрових комунікацій, протоколів передачі даних та методів їх аналізу. Впровадження навчальних програм для інженерів та операторів є необхідною умовою для успішної реалізації концепції цифрових підстанцій.

Таким чином, цифрові підстанції є важливим етапом розвитку електроенергетики, що дозволяє значно покращити якість та ефективність управління енергомережами. Їх подальший розвиток та вдосконалення сприятимуть підвищенню надійності електропостачання, оптимізації використання енергоресурсів та інтеграції розподіленої генерації в єдину енергосистему.

Розумна підстанція складається з багатьох передових цифрових компонентів.

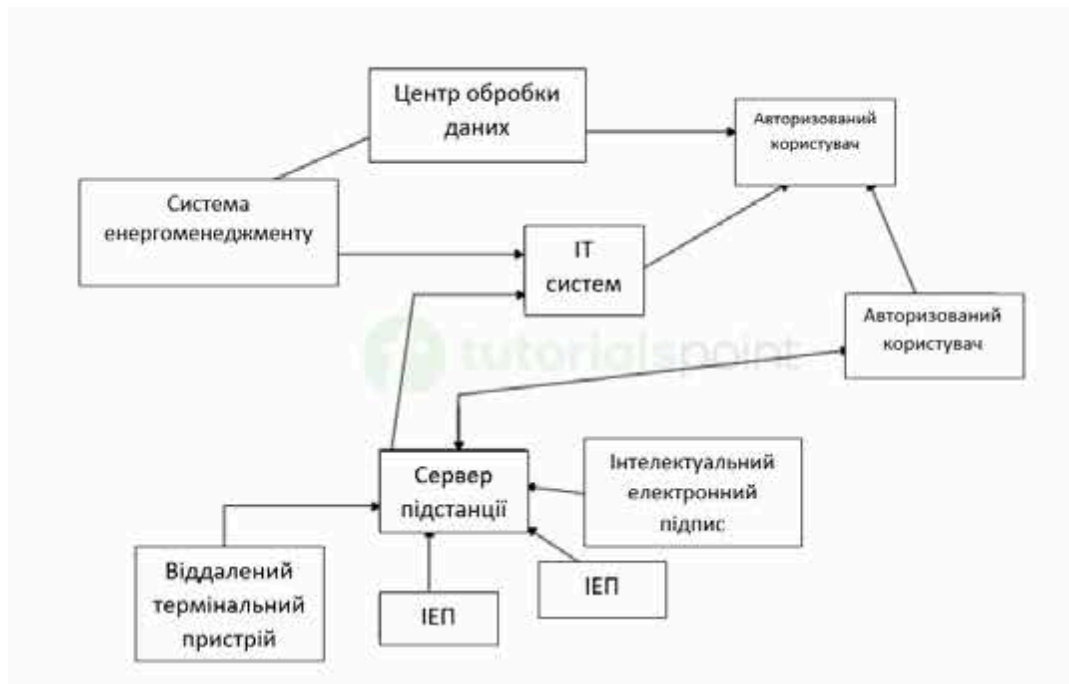


Рис. 2.1. Схематичне зображення компонентів цифрової підстанції

Основні компоненти розумної підстанції:

Інтелектуальні електронні пристрої (ІЕД) – ці пристрої використовуються для моніторингу та керування енергосистемою в реальному часі.

Приклади ІЕД включають розумні датчики, цифрові реле, автоматичні комутаційні пристрої тощо.

Розширена інфраструктура вимірювання (АМІ) – Ця система призначена для збору інформації про споживання енергії та продуктивність системи.

Ключовими компонентами АМІ є розумні лічильники та системи збору даних.

Цифрова система зв'язку – на розумних підстанціях для обміну даними між підстанцією та центральною системою керування використовується високошвидкісна та безпечна цифрова система зв'язку. Ця комунікаційна система також з'єднує пристрої IoT, які використовуються на розумній підстанції.

Автоматизована система контролю та моніторингу – Ця система використовується для забезпечення централізованого контролю, моніторингу та механізму аналізу даних на розумній підстанції. Поширеним прикладом автоматизованої системи контролю та моніторингу, яка використовується на розумних підстанціях, є SCADA (система диспетчерського контролю та збору даних).

Система кібербезпеки – Ця система використовується для захисту розумної підстанції та її даних від кіберзагроз.

Особливості розумних підстанцій

Нижче наведено деякі важливі функції розумної підстанції –

- розумна підстанція здатна здійснювати постійний моніторинг електричної мережі для виявлення будь-яких проблем у ній;
- розумні підстанції мають автоматизовані та дистанційні блоки керування для виконання автоматичних операцій мережі та операцій перемикання з віддаленого місця;
- розумні підстанції використовують інтелектуальні електронні пристрої для виконання всіх видів операцій;
- розумні підстанції також гарантують належне об'єднання всіх пристроїв керування та захисту в мережу;
- розумні підстанції регулюють такі параметри мережі, як напруга, частота тощо, щоб зробити роботу мережі ефективнішою;
- розумні підстанції оснащені технологіями для мінімізації дефіциту електроенергії та виявлення крадіжок електроенергії;

- розумні підстанції використовують методи великого аналізу, щоб заздалегідь передбачити збої обладнання або мережі.

Переваги розумних підстанцій

Розумна підстанція має кілька переваг перед традиційною електричною підстанцією. Основні переваги розумної підстанції:

-Розумні підстанції надійніші, оскільки вони можуть швидше виявляти й усувати несправності.

-Розумні підстанції забезпечують стабільне електропостачання.

-Розумні підстанції зменшують втрати енергії завдяки оптимізованій роботі мережі.

-Розумні підстанції знижують вартість експлуатації та обслуговування за рахунок автоматизації та прогнозного обслуговування.

-Розумні підстанції зводять до мінімуму ризику аварій електричним струмом.

-Розумні підстанції зменшують вплив на навколишнє середовище завдяки інтеграції відновлюваних джерел енергії та зниженню викидів парникових газів і вуглецевого сліду.

Проблеми в розумних підстанціях

Розумні підстанції мають кілька переваг, як обговорювалося вище. Але вони також стикаються з кількома викликами, які наведені тут –

-Розумні підстанції використовують різні пристрої, які можуть мати проблеми сумісності та технічні складності.

-Розумні підстанції схильні до ризиків кібербезпеки та несанкціонованого доступу до даних.

-Впровадження інтелектуальних підстанцій вимагає великих початкових інвестицій.

-Розумні підстанції використовують нові технології, для впровадження яких потрібні необхідні дозволи від регуляторних органів.

2.2. Стандартизація цифрових технологій (IEC 61850, IEEE 1588)

Стандартизація цифрових технологій, зокрема IEC 61850 та IEEE 1588, відіграє вирішальну роль у підвищенні сумісності та точності електричних і промислових систем. IEC 61850, розроблений Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), є комплексним міжнародним стандартом для протоколів зв'язку в системах автоматизації електричних підстанцій. Заснований у 1995 році стандарт був розроблений для заміни різних власних протоколів уніфікованою структурою, яка підтримує не лише автоматизацію підстанцій, але й різноманітні додатки, включаючи розподілені енергетичні ресурси та електричні транспортні засоби [10][11].

IEC 61850 — це міжнародний стандартний протокол зв'язку, який забезпечує одноманітність зв'язку на рівні станції за допомогою низки стандартизацій функцій пристрою. Стандарт IEC 61850, який широко використовується в енергетичній промисловості, висуває концепцію розширення інформації на підстанції як на логічному, так і на фізичному рівнях. Система автоматизації підстанції розділена на три рівні: рівень станції, рівень притоку та рівень процесу. ACSI використовується для обміну даними між рівнями.

IEC 61850 підсумовує комунікаційні послуги, необхідні для передачі інформації всередині підстанції, розробляючи абстрактний комунікаційний інтерфейс (ACSI), який не залежить від протоколів мережі та прикладного рівня.

Реалізація сервісу стандарту IEC 61850 розділена на три частини: сервіс MMS, сервіс GOOSE та сервіс SV.

Послуга MMS використовується між рівнем станції та рівнем притоку стандарту IEC 61850. Він забезпечує взаємодію між різними виробничими

пристроями в мережевому середовищі за допомогою підходу об'єктно-орієнтованого моделювання фактичних пристроїв.

GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) — це механізм швидкого обміну повідомленнями в IEC 61850 для передачі важливих сигналів у реальному часі між IED на підстанції.

SV (Simplified Values) використовується для передачі вибіркових значень на рівні процесу, що є найпоширенішою послугою для даних вимірювань у реальному часі на розумних підстанціях.

IEC 61850 ефективно вирішує проблему поганої сумісності між вторинними пристроями в енергосистемах, роблячи можливим обмін інформацією в системах автоматизації підстанцій і покращуючи масштабованість системи.

Стандарт IEC 61850 розділений на кілька частин, кожна з яких стосується конкретних аспектів автоматизації підстанцій.

1. IEC 61850-1: Ця частина містить вступ і огляд стандарту. Він пояснює фундаментальні принципи, мету стандарту та загальну архітектуру систем автоматизації підстанцій.
2. IEC 61850-2: Ця частина охоплює моделі даних і зв'язку для моделювання підстанцій і пристроїв. Він визначає абстрактні моделі даних і комунікаційні служби для пристроїв енергосистеми, що використовуються в автоматизації підстанцій.
3. IEC 61850-3: Ця частина стосується Загальних вимог. У ньому викладено загальні вимоги, специфікації та процедури тестування для цифрового зв'язку та обміну даними на підстанціях.
4. IEC 61850-4: Ця частина визначає аспекти управління системою та проектом. Він охоплює вказівки щодо процесу проектування системи, включаючи специфікацію системи, проектування, впровадження, тестування, введення в експлуатацію та обслуговування.

5. IEC 61850-5: Ця частина містить вимоги до зв'язку для функцій і моделей пристроїв. Він визначає вимоги до зв'язку для різних функцій підстанції та моделей пристроїв, пов'язаних із цими функціями.
6. IEC 61850-6: Ця частина стосується мови конфігурації для зв'язку на електричних підстанціях, пов'язаних із IED (інтелектуальними електронними пристроями). Він визначає мову та правила для конфігурації IED у системі на основі IEC 61850.
7. IEC 61850-7: Ця частина визначає основну структуру зв'язку. Він визначає основні комунікаційні служби та моделі для обміну інформацією в системах автоматизації підстанцій.
8. IEC 61850-8: Ця частина визначає відображення конкретних послуг зв'язку (до MMS та ISO/IEC 8802-3) для IEC 61850. Вона визначає, як послуги, зазначені в IEC 61850-7, відображаються в конкретних протоколах для зв'язку.

Характеристики IEC 61850

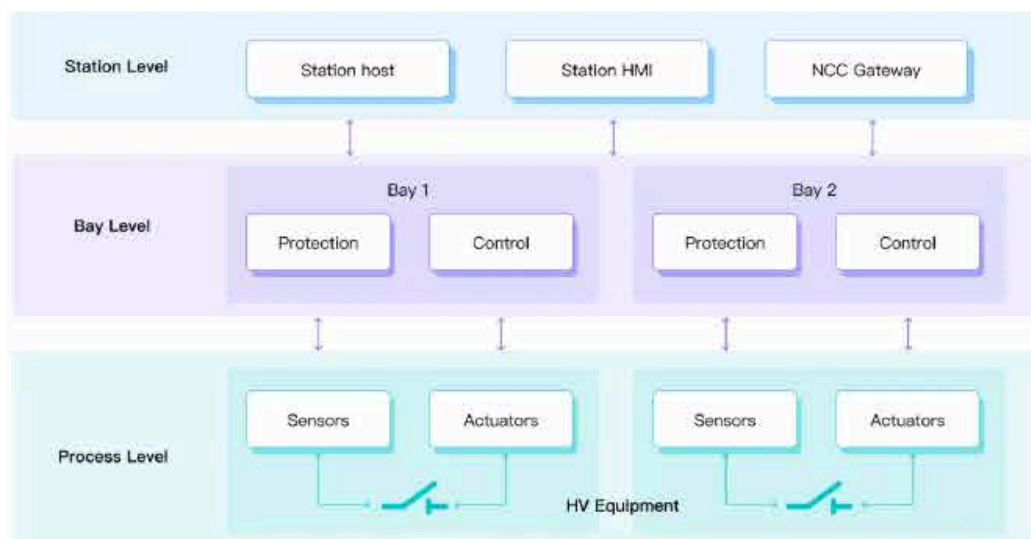


Рис.2.2. Логічне розрівнювання систем автоматизації підстанцій

Рівень станції: включає в себе людино-машинний інтерфейс (HMI) і шлюзи для зв'язку з центром дистанційного керування та інтеграції саморобних пристроїв на рівні відсіку до рівня підстанції. Він також виконує різні пов'язані з процесом функції, такі як реалізація команд керування для технологічного обладнання шляхом аналізу даних із IED рівня присікання.

Рівень відсіку: обладнання технологічного рівня підключено до станційної шини через IED на рівні відсіку, що реалізує функції моніторингу, захисту, контролю та запису. Тут ми можемо знайти інтелектуальні електронні пристрої під назвою IED. IEC 61850 визначає шину процесу для забезпечення зв'язку між IED та інтелектуальними приладами та розподільними пристроями.

Рівень процесу: включає обладнання розподільного обладнання, датчики та виконавчі механізми. Трансформатори струму та потенціалу розташовані на рівні процесу для збору системних даних і надсилання їх до пристроїв рівня присіків для автоматичного керування та захисту, які досягаються за допомогою автоматичних вимикачів і перемикачів з дистанційним керуванням. На цьому рівні є різні пристрої, такі як розподільні пристрої, такі як автоматичні вимикачі, перемикачі, трансформатор струму та трансформатор напруги.

Самоопис даних

IEC 61850 є стандартом для проектування систем автоматизації електричних підстанцій. Це широко використовуваний протокол у сфері енергосистем і автоматизації підстанцій. У IEC 61850 «Самоопис даних» відноситься до фундаментального принципу стандарту.

У IEC 61850 пристрої в мережі підстанцій описують дані, які вони виробляють і споживають, використовуючи стандартизовану модель даних. Ця модель даних містить таку інформацію, як тип даних, їх значення, одиниця вимірювання та інші відповідні метадані. Пристрої взаємодіють один з одним

на основі цього стандартизованого опису даних, забезпечуючи взаємодію між пристроями різних виробників.

Ключові аспекти самоопису даних у IEC 61850 включають:

- Стандартизовані об'єкти даних: IEC 61850 визначає набір стандартизованих об'єктів даних та їхніх атрибутів. Ці об'єкти охоплюють різні аспекти автоматизації підстанції, такі як вимірювання, команди керування, тривоги та налаштування.

- Загальні інформаційні моделі (CIM): CIM у IEC 61850 визначає логічну організацію інформації на підстанції. Це дозволяє різним пристроям розуміти семантику даних, якими вони обмінюються, гарантуючи, що пристрій може правильно інтерпретувати дані, отримані від іншого пристрою.

- Атрибути даних: кожен об'єкт даних у IEC 61850 має специфічні атрибути, які описують властивості даних, наприклад тип даних, діапазон і одиниці вимірювання. Цей детальний опис гарантує, що пристрої можуть правильно інтерпретувати та використовувати дані.

- Логічні вузли: IEC 61850 організовує дані в логічні вузли, кожен з яких представляє певну функцію в межах підстанції. Логічні вузли інкапсулюють об'єкти даних і забезпечують стандартизований інтерфейс для доступу до даних, які вони містять.

- Відображення даних: пристрої в мережі IEC 61850 спілкуються один з одним шляхом відображення своїх внутрішніх структур даних на стандартизовані об'єкти даних, визначені в стандарті. Це відображення дозволяє пристроям безперешкодно обмінюватися інформацією, незалежно від внутрішнього представлення даних.

- Динамічний обмін даними: IEC 61850 підтримує динамічний обмін даними, що дозволяє пристроям повідомляти про зміни у своїх даних у режимі реального часу. Цей самоописовий характер гарантує, що приймаючі пристрої

можуть інтерпретувати вхідні дані без попереднього знання внутрішньої структури даних відправника.

Таким чином, самоопис даних у IEC 61850 гарантує, що пристрої в системі автоматизації підстанції можуть точно інтерпретувати та використовувати дані, якими вони обмінюються, забезпечуючи безперебійний зв'язок та взаємодію між пристроями різних виробників. Ця стандартизація спрощує проектування, інтеграцію та технічне обслуговування систем автоматизації підстанцій, що призводить до більш ефективної та надійної роботи електромережі.

Багаторівнева інформаційна модель для IEC 61850

Інформаційна модель

Інформаційна модель містить п'ять рівнів - сервер, логічний пристрій, логічний вузол, об'єкт даних і атрибут даних.

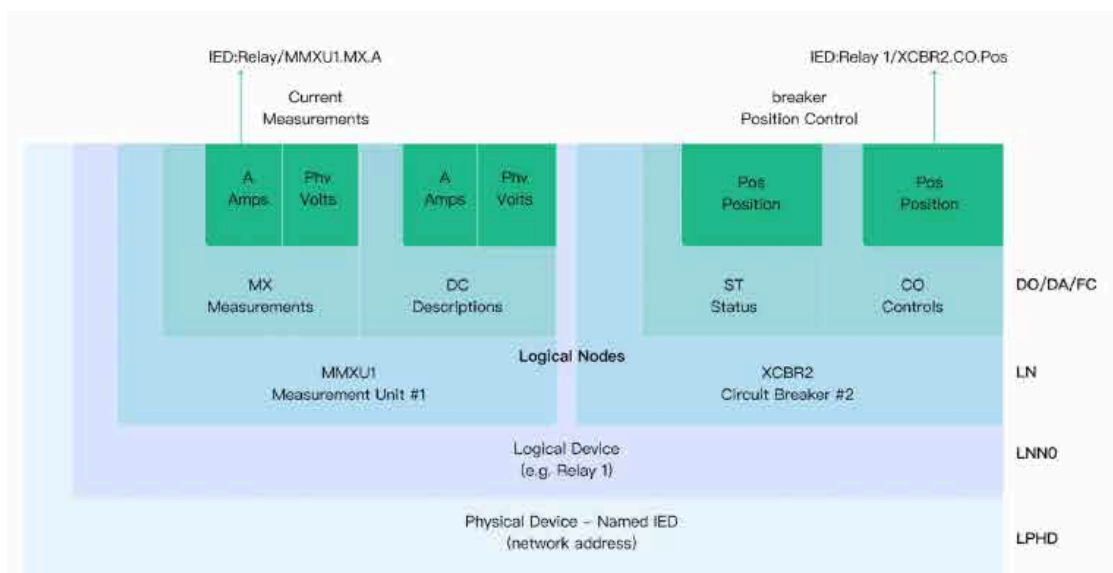


Рис.2.3. Інформаційна модель

Сервер: це можна розуміти як фізичні пристрої на підстанції, якими зазвичай є IED (інтелектуальний електронний пристрій) або RTU (віддалений термінальний пристрій). Сервер відповідає за обробку та зберігання

обладнання даних, одночасно надаючи зовнішні точки доступу та послуги автентифікації.

Логічний пристрій: абстрактне поняття для набору об'єктів даних, які використовуються для опису різних пристроїв і функцій у системі живлення.

Логічний вузол: об'єкт даних у логічному пристрої. Це найменша одиниця моделі даних. Логічні вузли містять об'єкти даних, які є піделементами логічних вузлів.

Об'єкт даних: Дані є одним із основних об'єктів у ІЕС 61850 для опису різних елементів енергетичної системи, таких як перемикачі, трансформатори, пристрої захисту тощо. Об'єкт даних може містити кілька атрибутів даних.

Атрибут даних: використовується для представлення низки характеристик даних. Кожен атрибут даних має назву та тип даних. Тип даних може бути базовим типом, таким як ціле число, з плаваючою комою, логічний тип тощо, або складеним типом, таким як структура, перерахування тощо.

Між логічними вузлами - даними - атрибутами даних знаходиться деревовидна структура, яка утворює ієрархічну модель даних. Атрибути даних є компонентами найнижчого рівня цієї моделі дерева. Ми можемо отримати значення зазначеного атрибута даних через ієрархію відображення адрес ІЕС 61850 у форматі адреси де FC є стандартним кодом функціонального обмеження.

Застосування та переваги

ІЕС 61850 відіграє ключову роль у модернізації електромереж, забезпечуючи моніторинг у реальному часі, автоматизацію та покращену стабільність мережі.

Його сумісність і гнучкість підвищують ефективність роботи підстанцій та інших електричних систем, сприяючи інтеграції різноманітних технологій і пристроїв. Стандарт визнається за його значний внесок у цифровізацію

електротехнічного підприємства, прокладаючи шлях до розумніших і оперативніших систем живлення.

IEEE 1588

Час є невід'ємною частиною периферійних обчислень через особливі вимоги до мережі та послуг на межі. Найбільшим рушієм периферійних обчислень є зменшення затримки. Це зменшення досягається за рахунок запуску служб ближче до користувача. Однак зменшення затримки не є єдиним чинником. Все більше мереж і послуг стали залежати від суворих і точних вимог до часу.

IEEE 1588, також відомий як протокол точного часу (PTP), є стандартом, призначеним для досягнення високої точності синхронізації часу в мережевих системах. IEEE 1588, спочатку створений для задоволення потреб у синхронізації різних промислових додатків, розвинувся через кілька версій, останньою з яких є IEEE 1588-2019, яка покращує точність, масштабованість і взаємодію протоколу в різних середовищах і пристроях.

IEEE 1588 забезпечує механізм для синхронізації годинників у мережі, що дозволяє пристроям підтримувати спільне уявлення про час навіть на великих відстанях. Ця можливість має вирішальне значення в таких секторах, як телекомунікації, розподіл електроенергії та промислова автоматизація, де точний час є важливим для цілісності системи та ефективності роботи.

На відміну від традиційних методів синхронізації часу, які залежать від центрального годинника, IEEE 1588 використовує розподілену архітектуру, що дозволяє кожному пристрою в мережі брати участь у процесі синхронізації.

Важливість у промислових мережах Ethernet

Значення IEEE 1588 посилюється в промислових мережах Ethernet, де синхронізацію часто потрібно підтримувати з точністю до мілісекунди. У таких середовищах процеси повинні бути скоординовані, щоб запобігти дорогим помилкам і забезпечити безпеку.

Використовуючи IEEE 1588, галузі можуть досягти надійного та точного часу, необхідного для таких додатків, як роботизовані складальні лінії та збір даних у реальному часі.

Основна відмінність між IEC 61850 та IEEE 1588 полягає в їхніх основних функціях. IEC 61850 наголошує на можливостях зв'язку та обміну даними, необхідних для автоматизації та керування в енергетичних системах, тоді як IEEE 1588 фокусується на досягненні високої точності синхронізації часу між пристроями.

Область застосування

IEC 61850 має ширшу сферу застосування в енергетичних підприємствах, охоплюючи аспекти автоматизації виробництва, передачі та розподілу, тоді як IEEE 1588 більше зосереджений на синхронізації та синхронізації в різноманітних промислових додатках.

Структури даних

IEC 61850 визначає як протоколи зв'язку, так і структуру, у якій дані зберігаються та керуються в IED, що призводить до зменшення потреб у апаратному забезпеченні та спрощеній реалізації проекту.

Проте IEEE 1588 не передбачає структури керування даними, а зосереджується на синхронізації позначок часу для забезпечення цілісності даних у системах. [15]

2.3. Висновок до розділу 2

У другому розділі здійснено аналіз технічного стану та характеристик навчального полігону кафедри інженерії енергосистем НУБіП України, що дозволило визначити його відповідність сучасним вимогам до цифрових підстанцій. Розглянуті компоненти та структура полігону свідчать про наявність бази для впровадження інтелектуальних технологій керування, моніторингу та захисту. Це створює підґрунтя для техніко-економічного обґрунтування доцільності модернізації об'єкта з урахуванням принципів цифровізації та підвищення рівня автоматизації електроенергетичних систем.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРАЦІЇ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ В СЕРЕДОВИЩІ ЦИФРОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ

3.1. Вибір сценарію інтеграції УЗЕ в структуру цифрової підстанції

У рамках аналізу структури макету розумної мережі 10 кВ, змонтованої на навчальному полігоні кафедри інженерії енергосистем НУБіП України, було обґрунтовано необхідність доповнення схеми умовними споживачами. Це дозволяє сформувати реалістичні сценарії роботи цифрової підстанції з урахуванням сучасних викликів — зокрема, інтеграції систем накопичення енергії (УЗЕ) та компенсації енергетичних небалансів.

Для забезпечення функціонального моделювання в структуру мережі були умовно додані наступні типи споживачів (рис.3.1):

- споживач 1 — житлово-офісного типу (з піковим навантаженням до 60 кВт), змодельований між опорами 1 та 2. Його профіль включає добові коливання, характерні для побутових споживачів, з підвищеним енергоспоживанням у вечірній час;

- споживач 2 — стратегічного/резервного характеру (25 кВт), підключений на ділянці перед КРУН 2 (після опори 6). Його наявність дозволяє перевіряти сценарії роботи мережі у випадках часткового чи повного відключення основного живлення;

- споживач 3 — з керованим навантаженням (demand response, до 20 кВт), змодельований після QF2. Він є демонстраційним прикладом динамічного керування споживанням за допомогою цифрових засобів та накопичувачів енергії;

- споживач 4 — об'єкт промислового типу (~ 120 кВт) з інтегрованою сонячною електростанцією (потужність СЕС — 200 кВт), підключений до мережі в точці між опорою 7 та КТП2. У денний час він генерує надлишкову енергію, що може накопичуватися в УЗЕ, а в нічний час — споживає енергію з мережі або УЗЕ. Такий сценарій дозволяє моделювати енергообмін та балансування мікромережі з врахуванням генерації з ВДЕ.

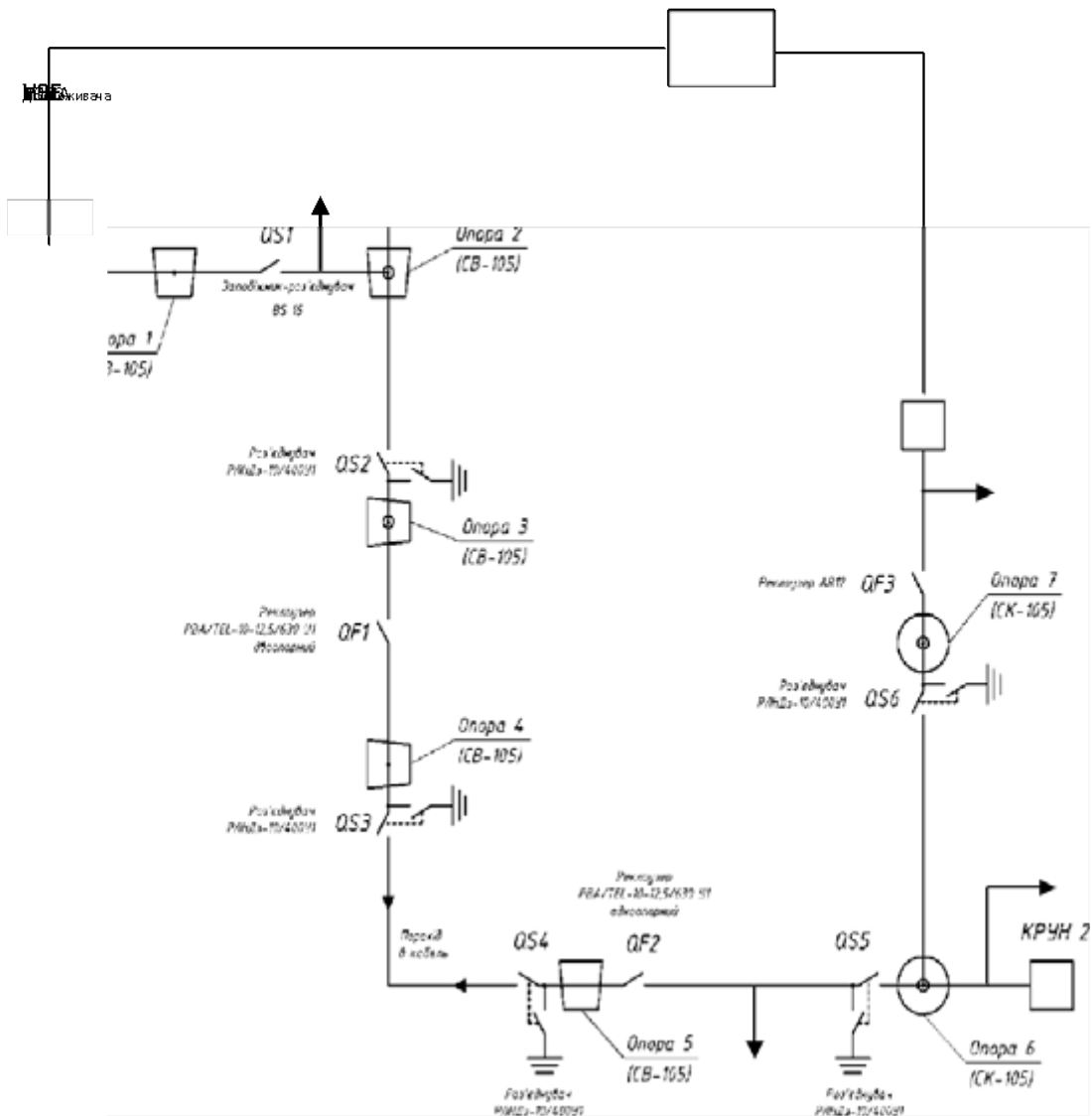


Рис.3.1. Інтеграція УЗЕ в структуру цифрової підстанції

Таким чином, модифікована модель дає змогу імітувати динамічну взаємодію навантажень і джерел енергії, що особливо актуально при впровадженні систем накопичення енергії, як-от Huawei LUNA2000-500KTL. Це забезпечує основи для подальшого аналізу режимів роботи цифрової підстанції та ефективності управління потоками енергії. [12].

Система УЗЕ розміщується в точці між КТП 1 та КТП 2, Таке розташування є стратегічно доцільним, оскільки дозволяє акумулювати надлишкову енергію від фотогенерації (сонячні панелі потужністю 200 кВт на

одному зі споживачів), а також використовувати накопичену енергію у години пікових навантажень або при аварійних відключеннях на живильних вводах з КТП 1 чи КТП 2.

УЗЕ виконує такі ключові функції:

- компенсація добових небалансів — у денний період надлишок генерації з сонячної електростанції зберігається в акумуляторних батареях, а в нічний або вечірній період використовується для живлення споживачів із піковим або критичним навантаженням;

- покриття пікових навантажень — зниження навантаження на трансформатори КТП та зменшення втрат у мережі за рахунок роботи УЗЕ під час високого попиту на електроенергію;

- резервування — у разі відмови або знеструмлення одного з вводів (КТП 1 або КТП 2), система УЗЕ забезпечує короткочасне резервне живлення критичних споживачів, таких як об'єкти стратегічного значення або керовані споживачі;

- Підтримка якості напруги — завдяки швидкому реагуванню інверторної частини УЗЕ на зміну навантаження, покращується стабільність параметрів електроенергії.

Запропонована інтеграція УЗЕ доповнює концепцію цифрової підстанції, орієнтованої на активне управління енергетичними потоками. Це дозволяє сформувати локальну мікромережу з елементами розподіленої генерації, накопичення енергії та цифрового керування, що відповідає сучасним підходам до побудови Smart Grid.

3.2. Обґрунтування технічних параметрів системи LUNA2000

У рамках даного проекту передбачається інтеграція системи накопичення енергії Huawei LUNA2000-500KTL з розрахунковою потужністю 500 кВт та ємністю до 2 000 кВт·год (2 МВт·год). Така конфігурація дозволяє акумулювати значні обсяги енергії від відновлюваних джерел (зокрема сонячної генерації споживача 5), а також ефективно забезпечувати потреби у покритті пікових навантажень та аварійному резервуванні. Обрана УЗЕ має підтримку протоколу IEC 61850, що дозволяє її повну інтеграцію в цифрову інфраструктуру підстанції з можливістю подальшого керування через SCADA/EMS-систему.

Huawei LUNA2000-500KTL — сучасна трифазна система накопичення енергії з можливістю гнучкої інтеграції у промислові мікромережі. Обрана система дозволяє забезпечити як пікове навантаження, так і резервне живлення, з високою ефективністю та масштабованістю. [16] (рис.3.2).

Основні технічні характеристики:

- номінальна потужність PCS (інвертора): 200 кВт;
- ємність батарейного модуля: до 2000 кВт·год (може змінюватися залежно від кількості модулів);
- тип батарей: LFP (літій-залізо-фосфатні) — висока пожежна безпека;
- коефіцієнт ефективності (round-trip): > 90%;
- ступінь захисту: IP66;
- інтерфейси керування: Modbus TCP/IP, сумісність з IEC 61850;
- час реакції на зміну навантаження: < 10 мс;
- можливість інтеграції з ВДЕ та цифровими платформами керування (EMS).

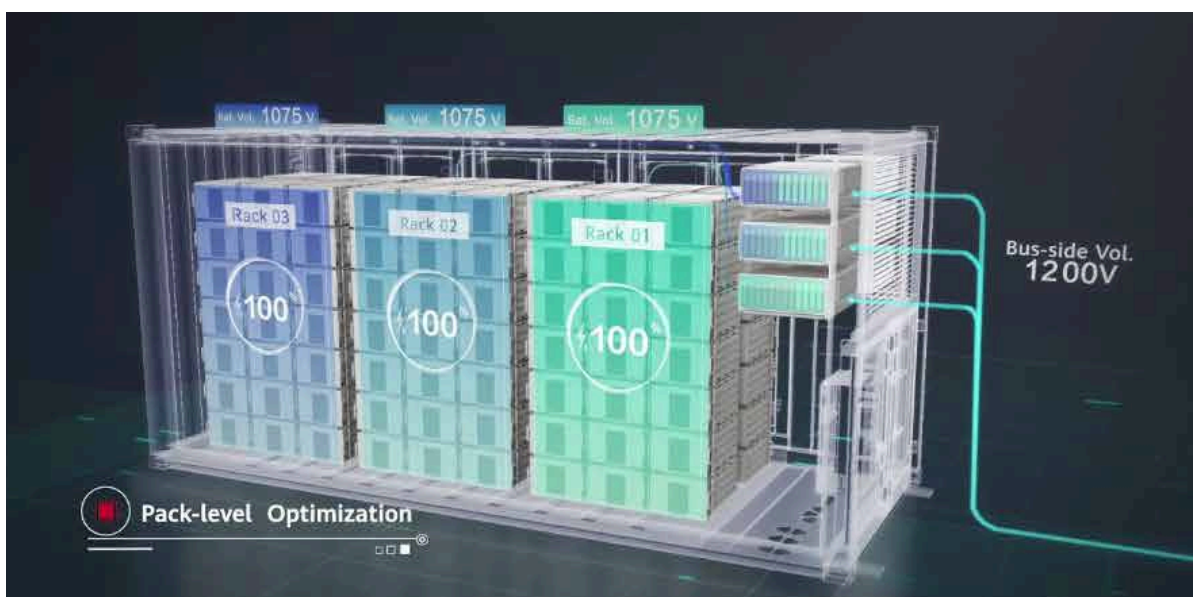


Рис.3.2. Візуальне зображення УЗЕ Huawei LUNA2000-500KTL

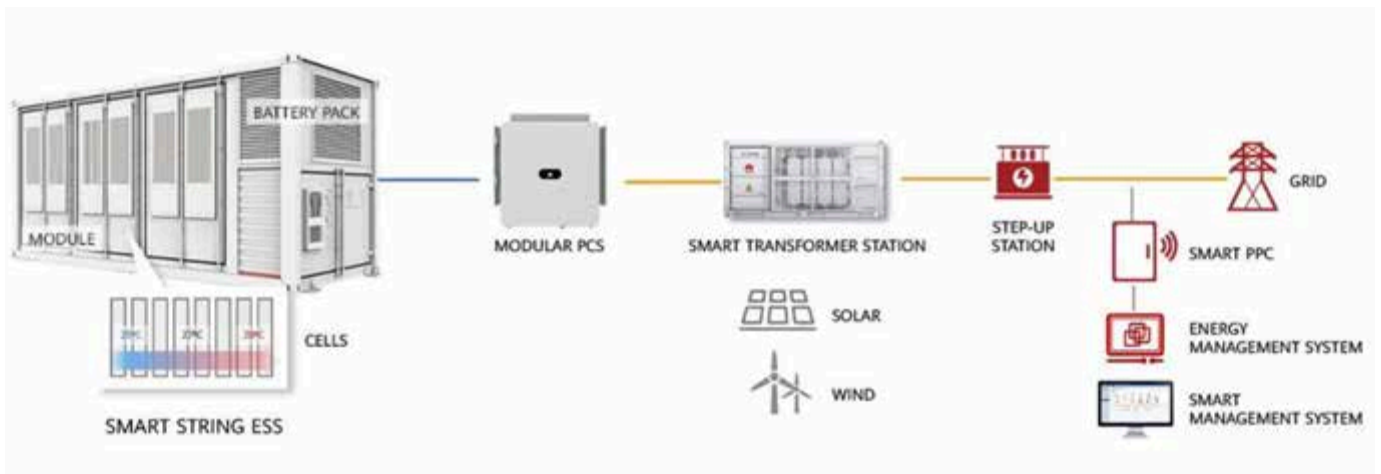


Рис.3.3. Інтегрована структура системи накопичення енергії (Energy Storage System, ESS) з елементами керування та підключенням до мережі

Вона демонструє типову архітектуру інтелектуального енергетичного комплексу, що може інтегруватися до цифрової підстанції або мікромережі. Опис: 1. SMART STRING ESS (Battery Pack, Module, Cells). Це модульна система акумуляторних батарей на основі літій-залізо-фосфатної (LFP) технології. Вона включає:

- Cells (елементи) — базові комірочки акумулятора;
- Module (модулі) — зібрані блоки з елементів, які формують батарейний струнний ланцюг;
- Battery Pack — повноцінна збірка з системами охолодження, безпеки, моніторингу та управління (BMS).

2. MODULAR PCS (Power Conversion System). Модульний інвертор, що перетворює постійний струм із батарей в змінний струм, синхронізований з мережею. Також виконує зворотне перетворення при зарядці;

3. SMART TRANSFORMER STATION. Цифрова трансформаторна підстанція, яка узгоджує рівні напруги та може мати вбудовану систему обліку, захисту та зв'язку.

4. STEP-UP STATION. Підвищувальна підстанція — підвищує напругу до рівня магістральної мережі для подачі електроенергії в загальну систему.

5. SMART PPC (Power Plant Controller). Контролер електростанції — узагальнена система, яка:

керує інверторами та трансформаторами;

здійснює реактивну/активну регуляцію;

взаємодіє з диспетчером (SCADA, EMS).

6. Energy Management System (EMS). Система енергоменеджменту виконує низку важливих функцій:

- моніторинг та прогнозування: Збір даних у реальному часі про навантаження, генерацію та стан УЗЕ, а також прогноз навантаження і сонячної генерації на добу вперед;

- оптимальне керування зарядом/розрядом: EMS визначає оптимальні періоди для заряджання УЗЕ (переважно вдень, за рахунок генерації від СЕС) та періоди розрядження (у вечірні та нічні години);

- управління мікромережею: У разі втрати зовнішнього живлення або перевантаження в мережі EMS автоматично забезпечує живлення критичних споживачів від УЗЕ або СЕС;

- виявлення аварійних ситуацій: EMS здатна ідентифікувати несправності, спрацювання захистів, відхилення напруги/частоти та ініціювати відповідні алгоритми реагування;

- комунікація: EMS обмінюється даними з іншими елементами цифрової підстанції через інтерфейси IEC 61850, MODBUS або власні протоколи Huawei.

Таким чином, EMS не лише зменшує потребу в ручному втручанні, а й реалізує повноцінну автономну роботу енергетичного вузла за принципами Smart Grid.

7. Smart Management System. Інтерфейс візуалізації, аналітики та диспетчеризації — відображає в реальному часі параметри ESS, потоки енергії, аварійні сигнали, графіки тощо.

Акумуляторна система Huawei LUNA2000, яка пропонується для використання на навчальному полігоні, побудована на основі літій-залізо-фосфатної технології (LiFePO₄), яка вирізняється високою безпекою, стабільністю та довговічністю. Основні експлуатаційні характеристики:

- кількість циклів заряду/розряду: понад 5000 циклів при 90% глибині розряду (DoD), що відповідає щоденній експлуатації протягом 13–15 років;
- ефективність: понад 95% round-trip efficiency, що означає незначні втрати під час зберігання енергії;
- Термін служби: до 20 років при правильних умовах експлуатації (температурний режим, рівень заряду);
- інтелектуальна система BMS (Battery Management System): забезпечує балансування елементів, захист від перенапруги, перегріву, короткого замикання тощо;
- модульна архітектура: дозволяє масштабувати систему до необхідної потужності без заміни всієї установки.

3.3. Оцінка впливу інтеграції УЗЕ на надійність та енергоефективність підстанції

Інтеграція системи накопичення енергії (УЗЕ) Huawei LUNA2000 потужністю 500 кВт і ємністю 2 МВт·год у структуру цифрової підстанції навчального полігону кафедри інженерії енергосистем НУБіП України дозволяє значно покращити як показники надійності, так і енергоефективності функціонування системи. Аналіз проведено на основі

модифікованої структури мережі з чотирма категоріями споживачів, що мають різний профіль навантаження, а також інтегрованої сонячної електростанції (СЕС) потужністю 200 кВт.

Надійність енергопостачання

УЗЕ, підключена паралельно до шин КТП1 та КТП2, виконує функцію буфера між джерелами живлення та споживачами, що дозволяє забезпечити безперервність електропостачання у випадках аварій, зниження якості напруги або перевантаження мережі.

Для стратегічного споживача (Споживач 3, 25 кВт): система гарантує резервне живлення щонайменше протягом 40 годин при повному заряді УЗЕ. Це дозволяє уникнути порушення критичних технологічних процесів або втрати даних.

Для керованого навантаження (Споживач 4, 20 кВт): УЗЕ забезпечує можливість автономної підтримки навантаження, або оперативного зменшення споживання в критичні моменти. Ця гнучкість підвищує стійкість системи до короткочасних збурень.

Для споживача житлово-офісного типу (Споживач 2, 60 кВт): найбільш вразливого до вечірніх пікових навантажень, можливість живлення від УЗЕ у вечірній час значно підвищує комфорт і стабільність електропостачання, компенсуючи коливання навантаження та напруги.

Балансування добового навантаження

СЕС генерує пікову потужність у денний час — з 10:00 до 16:00 — і формує профіцит енергії, який за відсутності накопичувача або недосконалої координації з навантаженням, не може бути ефективно використаний. Враховуючи потенціал генерації СЕС:

- денна генерація в умовах сонячного дня може становити до 1000–1100 кВт·год;

- типове споживання у денний час споживачів 2, 3 і 4 разом — до 100–120 кВт, що призводить до утворення профіциту понад 800 кВт·год.

УЗЕ здатна повністю акумулювати цей надлишок, забезпечуючи подальше його використання у вечірній час (17:00–22:00), коли навантаження на мережу досягає піку:

- Споживач 2 (житлово-офісний) у вечірній час споживає до 60 кВт протягом 5 годин — загалом 300 кВт·год;

- Споживач 5 (промисловий) у нічний час може спожити додатково 300–400 кВт·год у разі зупинки СЕС.

Таким чином, УЗЕ здатна перекривати понад 75% критичних вечірніх навантажень, зменшуючи пікові перетоки з мережі та навантаження на силові трансформатори КТП.

Зменшення втрат енергії та покращення енергоефективності

Інтеграція УЗЕ сприяє оптимізації режиму роботи підстанції:

- вирівнювання профілю навантаження сприяє зниженню втрат у лініях за рахунок зменшення струмів у пікові години;

- забезпечення роботи трансформаторів у номінальному діапазоні (відсутність перевантажень) дозволяє підвищити їх ККД та продовжити ресурс експлуатації;

- швидкодійний інвертор УЗЕ сприяє стабілізації напруги на шинах 10 кВ у випадку коливань навантаження, що покращує якість електроенергії.

Гнучкість та цифрове управління

Завдяки інтеграції УЗЕ в цифрову платформу підстанції (Smart PPC, EMS), можливе:

- автоматичне керування зарядом/розрядом відповідно до графіка навантаження, генерації та тарифної політики;

- прогнозування режимів роботи на основі історичних даних навантаження та погодних умов (генерація СЕС);
- пріоритезація споживачів під час обмеженого ресурсу УЗЕ — наприклад, першочергове забезпечення стратегічного або керованого навантаження.

Таблиця 3.1

Узагальнення впливу інтеграції

Показник	До інтеграції УЗЕ	Після інтеграції УЗЕ
Безперервність живлення	Лише за рахунок резервного вводу	Підтримка УЗЕ до 2 год при 250 кВт
Втрати в мережі	Підвищені в пікові години	Знижені за рахунок розвантаження
Використання надлишкової генерації	Часткове, з відключеннями СЕС	Повне використання через заряд УЗЕ
Якість напруги	Варіації у періоди збурень	Стабілізація через інвертор УЗЕ
Рівень автоматизації	Середній	Високий (через EMS + Smart PPC)

Для оцінки ефективності інтеграції системи накопичення енергії в структуру цифрової підстанції було проведено розрахунок тривалості автономного живлення умовних споживачів у разі повного відключення живлення з боку трансформаторних підстанцій КТП1 і КТП2. До модифікованої мережі включено наступні споживачі:

- споживач 1 — умовно побутового типу, потужність приймається на рівні 30 кВт;
- споживач 2 — житлово-офісний, з піковим навантаженням 60 кВт;
- споживач 3 — резервний/стратегічний об'єкт, потужність 25 кВт;

- споживач 4 — промисловий об'єкт з інтегрованою СЕС, споживання у вечірній час становить до 120 кВт.

Сумарне пікове навантаження становить:

$$P_{\text{загальна}}=P_1+P_2+P_n, \quad (3.1)$$

P_1, P_2, P_n - навантаження від споживачів.

$$P_{\text{загальна}}=30+60+25+120=235\text{кВт}$$

Для живлення цих навантажень використовується система УЗЕ типу Huawei LUNA2000, що має:

- номінальну потужність: 500 кВт;
- енергоємність: 2 000 кВт·год (2 МВт·год).

Резервний режим роботи передбачає, що всі споживачі можуть бути забезпечені електроенергією лише від накопиченої енергії в акумуляторних батареях. Розрахунок тривалості живлення здійснюється за формулою:

$$t = \frac{E_{\text{УЗЕ}}}{P_{\text{загальна}}} = \frac{2000 \text{ кВт} \cdot \text{год}}{235 \text{ кВт}} \approx 8,5 \text{ год.} \quad (3.2)$$

Фактичне навантаження на УЗЕ:

$$P_{\text{фактичне}}=P_{\text{заг.}}-P_{\text{ген.}}, \quad (3.3)$$

$$P_{\text{фактичне}}= 235-200=35\text{кВт}$$

$$t_2= 2000/35=57,1 \text{ год}$$

Таким чином, система УЗЕ забезпечує автономне живлення для всіх споживачів протягом орієнтовно 8,5 годин, що є достатнім для проходження пікових навантажень або короткострокового аварійного режиму. У денний час з СЕС: автономна робота ≈ 57 годин (фактично – покриття суттєво зменшує розряд акумулятора, можливий режим підтримки резерву). Така характеристика підвищує гнучкість та надійність роботи цифрової підстанції, а також відповідає вимогам до елементів сучасної Smart Grid-інфраструктури.

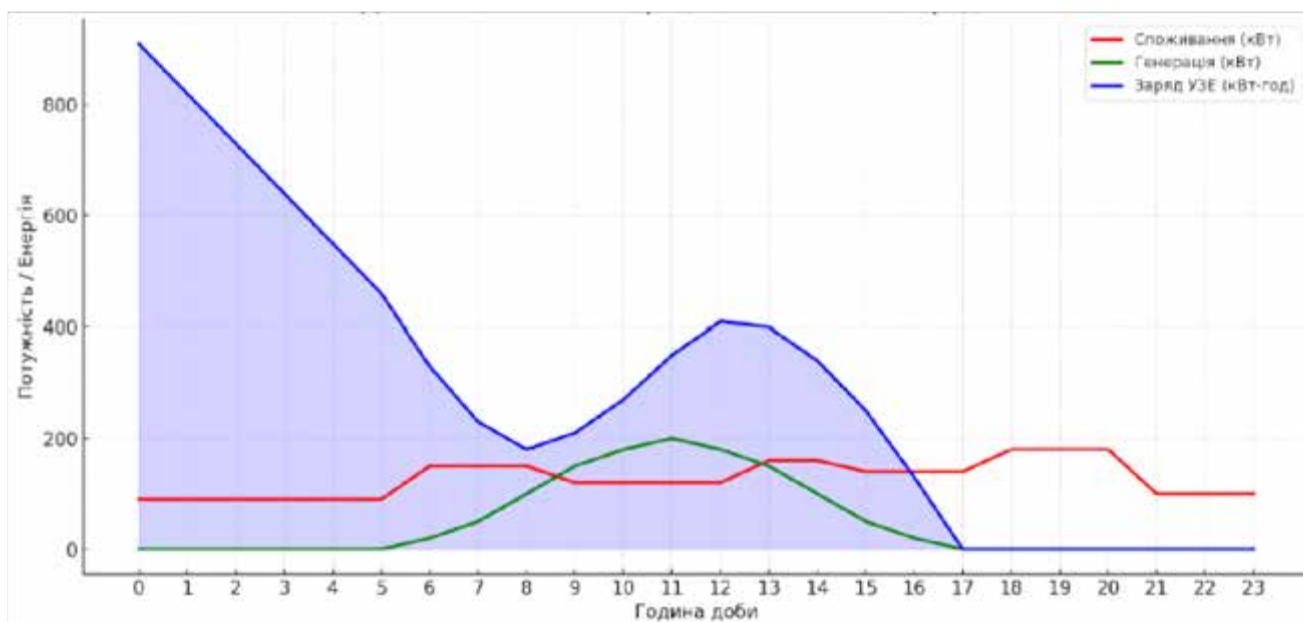


Рис.3.4. Добовий енергетичний баланс: генерація (зелена крива), споживання (червона крива) та рівень заряду УЗЕ (синя крива та площа)

Видно, що в нічний і вечірній час УЗЕ активно розряджається для покриття дефіциту, а вдень заряджається за рахунок генерації.

3.4. Висновок до розділу 3

У третьому розділі було проведено обґрунтування та розробку технічних рішень щодо впровадження системи накопичення енергії (УЗЕ) в структуру цифрової підстанції навчального полігону кафедри інженерії енергосистем НУБіП України. Враховуючи сучасні тенденції розвитку Smart Grid і зростаючу роль розподіленої генерації, зокрема сонячних електростанцій, було змодельовано реалістичний сценарій функціонування мережі з урахуванням чотирьох умовних споживачів різного типу, включно з об'єктом, обладнаним СЕС на 200 кВт.

Аналіз енергетичних потоків показав, що впровадження УЗЕ потужністю 500 кВт дозволяє:

- ефективно акумулювати надлишкову денну генерацію з ВДЕ;
- забезпечити покриття нічного та вечірнього навантаження;
- зменшити добові небаланси;
- підвищити надійність живлення критичних споживачів;
- знизити пікові навантаження на трансформатори ТП1 та ТП2.

Результати розрахунків підтверджують доцільність інтеграції УЗЕ як елементу гнучкості, що дозволяє реалізувати концепцію мікромережі з можливістю динамічного керування потоками енергії. Це формує підґрунтя для подальшого розвитку цифрових підстанцій та вдосконалення систем електропостачання на базі навчальних полігонів.

РОЗДІЛ 4

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ

4.1. Вплив цифровізації на зниження енергоспоживання

Вплив цифровізації на скорочення споживання енергії охоплює трансформаційні ефекти передових технологій у різних секторах, суттєво змінюючи моделі управління енергією та споживання. З моменту свого впровадження в 1970-х роках цифровізація дозволила покращити управління мережею, ухвалення рішень щодо видобутку ресурсів і автоматизацію процесів у важкій промисловості, що призвело до суттєвих покращень у сфері енергоефективності та практики сталого розвитку.[14]

Технології Smart Grid є прикладом важливого механізму, за допомогою якого цифровізація сприяє енергозбереженню. Використовуючи дані в реальному часі та забезпечуючи двосторонній зв'язок між комунальними службами та споживачами, розумні мережі оптимізують розподіл електроенергії та ефективніше інтегрують відновлювані джерела енергії, тим самим зменшуючи загальне споживання енергії. Крім того, програми реагування на попит стимулюють користувачів скорочувати використання енергії в періоди пікового навантаження, досягаючи економії до 6% енергії в уражених будівлях, тоді як інтеграція електромобілів відкриває нові можливості для оптимізації споживання енергії за допомогою розумної інфраструктури зарядки. Незважаючи на ці досягнення, цифровізація споживання енергії не позбавлена проблем. Занепокоєння щодо кібербезпеки, сумісності між цифровими системами та потреби в нових навичках для керування цими технологіями можуть перешкоджати широкому впровадженню.

Незважаючи на ці досягнення, цифровізація споживання енергії не позбавлена проблем. Занепокоєння щодо кібербезпеки, сумісності між цифровими системами та потреби в нових навичках для керування цими технологіями можуть перешкоджати широкому впровадженню. Загалом перетин цифровізації та енергоспоживання відображає складний ландшафт, який характеризується як значними потенційними перевагами, так і помітними проблемами, що вимагає ретельного розгляду та стратегічного впровадження, щоб максимізувати його ефективність у сприянні сталим практикам у різних секторах.

Механізми впливу

Цифровізація стала трансформаційною силою для зменшення споживання енергії в різних секторах. Інтеграція розумних технологій і підходів, що керуються даними, призвела до появи численних механізмів, які підвищують енергоефективність і підтримують цілі сталого розвитку.

Технології Smart Grid

Інтелектуальні мережі використовують передові цифрові комунікаційні технології для керування потоками електроенергії з різноманітних джерел генерації, ефективно задовольняючи потреби споживачів. На відміну від традиційних електромереж, які працюють за моделлю одностороннього зв'язку, розумні мережі забезпечують двосторонній зв'язок між комунальними підприємствами та споживачами, сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень щодо використання енергії. До ключових особливостей інтелектуальних мереж належать моніторинг у режимі реального часу за допомогою інтелектуальних лічильників, підвищена надійність завдяки автоматизованому виявленню відключень та бездоганна інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова.

Очікується, що розгортання цих систем дасть значну економію енергії шляхом оптимізації моделей розподілу та споживання електроенергії.

Реагування на попит і енергозбереження

Одним з найважливіших механізмів енергозбереження є ініціативи реагування на попит, які стимулюють споживачів зменшувати споживання енергії в періоди пікового навантаження. Технології Smart-Grid полегшують доступ до даних про використання, дозволяючи будинкам і підприємствам ефективніше економити енергію. Дослідження показують, що реагування на попит може досягти до 6% економії споживання енергії в постраждалих будівлях, що означає приблизно 3% загального споживання електроенергії.

Крім того, краще уявлення про розподіл електричного навантаження на об'єктах може призвести до цілеспрямованих модернізацій, які підвищують енергоефективність, сприяючи приблизно 1,5% економії.

Кібербезпека та стійкість

Цифровізація енергетичних систем вимагає зосередження уваги на кібербезпеці для захисту від вразливостей, які можуть виникнути внаслідок конвергенції ІТ-ОТ. Використовуючи принципи безпеки за проектом, енергетичні системи можуть бути краще захищені від кіберзагроз, забезпечуючи стійкість критичної інфраструктури під час збоїв.

Ініціативи уряду США щодо створення систем реагування на інциденти також підкреслюють важливість співпраці в енергетичному секторі для пом'якшення системних ризиків і підвищення загальної безпеки.

Інтеграція електромобілів

Поява електричних і гібридних транспортних засобів відкриває ще один шлях до економії енергії, завдяки інтелектуальній зарядній інфраструктурі, призначеній для оптимізації заряджання в години непікової навантаження, коли електроенергія є доступнішою та менш вуглецевою. Очікується, що ця інтеграція підтримає додаткове скорочення споживання енергії на 3%, що узгоджується з ширшим переходом до стійких енергетичних систем.

Цифровізація в промисловості

У промислових умовах цифрові технології забезпечують значну ефективність уздовж ланцюжка поставок. Хоча автоматизація може замінити певні ролі, пов'язані з рутинними завданнями, очікується, що загальний вплив цифровізації підвищить енергоефективність без значного зменшення попиту на інженерну та будівельну працю, пов'язану з фізичною інфраструктурою.

Такі інновації, як автономні системи та системи інтелектуального дому, вже на горизонті, обіцяючи подальше зниження енергоємності в наданні послуг, одночасно усуваючи потенційні ефекти відскоку від збільшення загального споживання енергії. [15]

Ландшафт споживання енергії готовий до значних трансформацій, оскільки цифровізація продовжує змінювати форму галузі. Очікується, що інновації в галузі штучного інтелекту (ШІ), машинного навчання та прогнозу аналітики відіграватимуть вирішальну роль у вдосконаленні систем управління енергією, роблячи їх більш ефективними, стійкими та стійкими.

Оскільки, за прогнозами, до 2050 року споживання енергії у світі зросте майже на 50%, головним чином через швидку індустріалізацію та зростання населення в країнах з економікою, що розвивається, потреба в передових цифрових інструментах для оптимізації виробництва та розподілу енергії стає дедалі гострішою.

Цифрова трансформація та енергоефективність

Очікується, що цифровізація запропонує значні переваги в енергоефективності, особливо в будівельному секторі. Дослідження показують, що розумні технології, такі як розумні термостати та освітлення, можуть призвести до скорочення загального споживання енергії в житлових і комерційних будівлях до 10% між 2017 і 2040 роками.

Цей зсув підтримується системами активного енергоменеджменту, які використовують дані в реальному часі для прийняття рішень, дозволяючи

підприємствам мінімізувати споживання енергії при максимальному збільшенні ефективності роботи.

Інтеграція відновлюваної енергетики

Інтеграція відновлюваних джерел енергії стане важливою тенденцією в найближчі роки. За прогнозами, до 2050 року відновлювані джерела енергії, такі як вітер і сонце, становитимуть половину світового виробництва електроенергії. Однак проблема полягає в тому, щоб ефективно включити ці змінні джерела енергії в існуючі енергетичні системи.

Цифрові технології, у тому числі прогнозування попиту на основі штучного інтелекту та інтелектуальні мережі з підтримкою Інтернету речей, будуть важливими для забезпечення надійності та ефективності цих систем.

Кліматичні цілі та регуляторний тиск

Суворіші екологічні норми в усьому світі викликають нагальність цифрової трансформації в енергетичному секторі. Уряди прагнуть досягти нульових викидів до 2050 року, що вимагає агресивної політики та інновацій в енергоменеджменті для досягнення цих цілей. Наприклад, Європа вимагає, щоб до 2030 року 40% енергії вироблялося з відновлюваних джерел.

Відповідність цим нормам можна сприяти за допомогою блокчейну та систем моніторингу з підтримкою Інтернету речей, які відстежують викиди та споживання енергії.

4.2. Аналіз резервування системи живлення

Резервування системи живлення відноситься до принципів проектування та конфігурацій, реалізованих для забезпечення безперервної та надійної доставки електроенергії, особливо в критичних середовищах, таких як центри обробки даних, лікарні та телекомунікаційні об'єкти. Ця концепція життєво важлива для пом'якшення ризиків, пов'язаних із збоями електропостачання,

які можуть призвести до збоїв у роботі та значних фінансових втрат. Важливість резервування в системах електропостачання підкреслюється зростаючою залежністю від технологій у сучасному суспільстві, що робить його важливою сферою вивчення та практики в інженерії та проектуванні систем.

Конфігурації резервування включають різні підходи, такі як конфігурація N , $N+1$, $N+2$ і $2N$ резервування, кожен з яких пропонує різні рівні відмовостійкості та надійності системи. Наприклад, резервування $N+1$ забезпечує один додатковий блок живлення понад те, що необхідно для задоволення навантаження системи, що забезпечує безперебійну роботу в разі збою. На відміну від цього, резервування $2N$ подвоює кількість джерел живлення, повністю усуваючи окремі точки відмови, і часто реалізується в критично важливих програмах, де простої є неприйнятними.

Незважаючи на те, що ці конфігурації підвищують надійність, вони також можуть ускладнити та збільшити вимоги до обслуговування, що призведе до постійних дебатів щодо найефективніших стратегій збалансування вартості та надійності в проектуванні системи.

Крім того, аналіз резервування повинен враховувати такі фактори, як робоче навантаження, умови навколишнього середовища та необхідність регулярного технічного обслуговування та тестування, щоб гарантувати, що системи резервного копіювання працюють у разі потреби. Ці елементи сприяють загальній ефективності заходів резервування та впливають на продуктивність систем електропостачання за різних умов.

Незважаючи на свої переваги, резервування також створює проблеми, такі як потенційні затримки у відновленні під час збоїв і складність, створена кількома компонентами, які можуть ускладнити процеси обслуговування та усунення несправностей.

Оскільки технологічний прогрес і еволюція енергетичної політики спричиняють зміни в системах електропостачання, аналіз резервування залишається критично важливим для інженерів і організацій, які прагнуть підвищити експлуатаційну стійкість. Ця постійна еволюція відображає динамічний характер попиту на енергію та зростаючу потребу в надійній енергетичній інфраструктурі у взаємопов'язаному світі. [16]

Види резервування

Резервування в системах електропостачання має важливе значення для забезпечення безперервної роботи та надійності в критичних середовищах, таких як центри обробки даних і обчислювальні системи високої доступності. Існує кілька типів конфігурацій резервування, які можна реалізувати, кожна з яких має свої специфікації та переваги.

Поширені такі типи резервування:

- Конфігурація N, без резервування (рис.4.1)

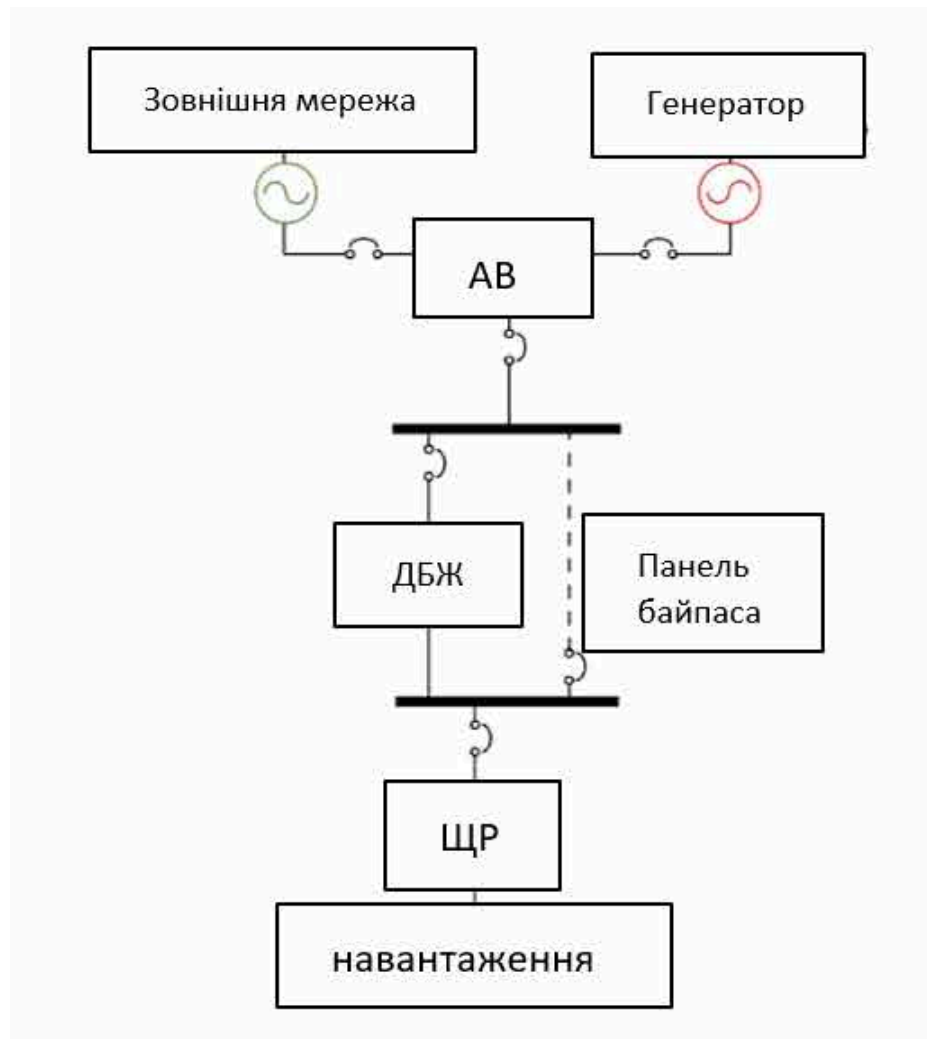


Рис. 4.1. Конфігурація N

Ця схема є найбільш простою і дешевою в побудові. Мінімальна кількість компонентів системи в порівнянні з подальшими схемами, а також максимальний ККД джерела безперебійного живлення завдяки його роботі на повне навантаження, забезпечують найменшу вартість володіння даним рішенням.

Однак те, що кожен елемент системи (трансформатор напруги, панель автоматичного включення резерву (АВР), дизельна електростанція, щит розподілу живлення (ЩР) і ДБЖ) не має резервування, підвищує ризик відключення навантаження в разі виходу з ладу будь-якого з компонентів.

Також слід зазначити, що під час проведення сервісного обслуговування окремих компонентів системи, буде відсутній захист навантаження від зникнення зовнішнього енергопостачання.

У зв'язку з цим найчастіше дану схему застосовують для найменш критичних споживачів, відключення яких не призведе до суттєвих фінансових втрат.

Резервування N+1

Резервування N+1 передбачає наявність одного додаткового джерела живлення (ДБЖ). Критично важливі споживачі живляться через ДБЖ, яке розраховане на повну потужність споживачів і забезпечує їх енергопостачання при короткочасних відключеннях зовнішньої мережі, а також гарантує високу якість напруги живлення. Ця конфігурація гарантує, що якщо один блок живлення виходить з ладу, додатковий блок може взяти на себе роботу, мінімізуючи ризик простою та зберігаючи цілісність системи (рис.4.2).

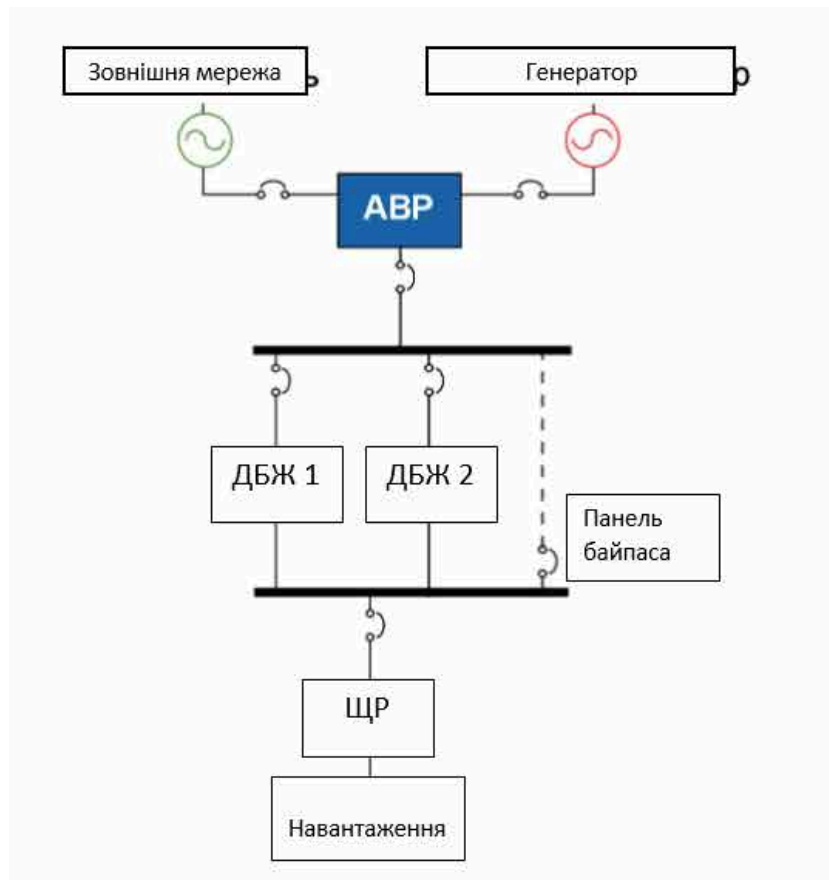


Рис.4.2. Схематичне зображення резервування N+1

У порівнянні з попереднім рішенням в такій схемі залишаються одна зовнішня мережа і один дизельний генератор, але при цьому встановлюється група ДБЖ з конфігурацією «N+1».

Ця конфігурація має на увазі установку в паралельну роботу декількох джерел безперебійного живлення однакової потужності. При цьому потужність і кількість джерел безперебійного живлення вибираються таким чином, щоб при виході з ладу будь-якого з ДБЖ ті ДБЖ, що залишилися, могли забезпечити роботу повного навантаження.

Така схема не набагато складніша за попередню в побудові, але при цьому істотно більш надійна, так як поломка одного з ДБЖ або його відключення на час сервісного обслуговування не приведуть до відключення критично важливих споживачів.

Однак слід зазначити, що трансформатор напруги, генератор дизельний, щит розподілу живлення (ЩРП), панель автоматичного включення резерву (АВР) залишаються без резервування, що зберігає ризики зникнення живлення на навантаженні в разі їх поломки або відключенні на час профілактичного обслуговування.

Резервування N+X

Подібно до резервування N+1, резервування N+X включає кілька додаткових блоків живлення понад необхідну кількість. Цей тип резервування забезпечує вищий рівень відмовостійкості, оскільки дозволяє використовувати більше одного резервного джерела для підтримки навантаження під час збоїв.

Резервування 2N+1 (розділене резервування)

Така схема має на увазі під собою установку двох трансформаторів напруги, які забезпечують дві незалежні зовнішніх мережі для навантаження. Один електрогенератор дизельний забезпечує резервне енергопостачання споживачів, які розділені на групи. Кожна група навантажень підключена через два окремих щита розподілу живлення (ЩРП) до двох незалежних джерел безперебійного живлення (ДБЖ) (рис.4.3).

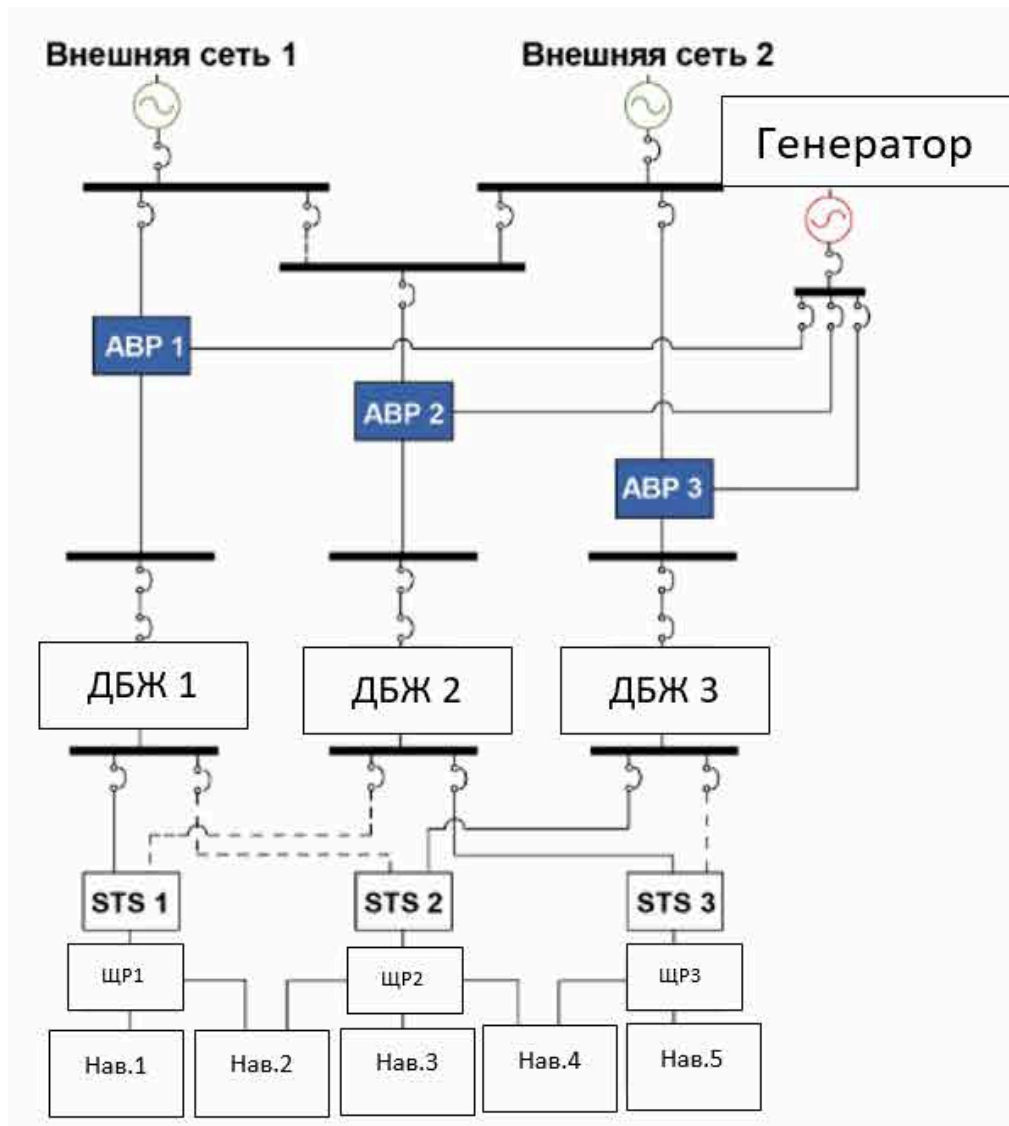


Рис. 4.3. Схематичне зображення резервування $2N+1$ (розділене резервування)

STS – це Static Transfer Switch, або Статичний комутатор навантаження.

Функції:

- автоматично перемикає живлення навантаження між двома (або більше) джерелами електроенергії;
- Використовує твердотільні (електронні) ключі, що забезпечують надзвичайно швидке перемикання без переривання живлення;
- У випадку збою одного з джерел STS миттєво перемикає живлення на резервне.

У цій конфігурації STS дозволяє навантаженню перемикатися між різними каналами електроживлення. Це забезпечує гнучке розподілене резервування, зменшуючи ризик повного відключення навантаження. STS широко використовується в ЦОД (центр обробки даних), промислових системах безперебійного живлення та критично важливих об'єктах.

Таке резервування складніше попередніх двох рішень, а також дорожче їх як в побудові, так і в подальшій експлуатації. Але воно підвищує надійність і стійкість до відмов системи електроживлення, завдяки тому, що виключається відключення навантаження при виході з ладу або сервісному обслуговуванні одного з компонентів.

Конфігурація 2N (система+система)

У конфігурації резервування 2N загальна кількість блоків живлення подвоюється, забезпечуючи два повних набори джерел живлення для обробки необхідного навантаження. Таке налаштування значно підвищує надійність, оскільки усуває окремі точки відмови, забезпечуючи постійну доступність як основного, так і резервного джерела живлення (рис.4.4).

Крім двох незалежних трансформаторів напруги, необхідно купити дизельний генератор для резервування кожної зовнішньої мережі. Кожне навантаження живиться від двох незалежних щитів розподілу живлення (ЩР). При цьому кожен ЩР підключений до свого ДБЖ. Для підвищення надійності практикується крім резервування ДБЖ на рівні систем додатково забезпечувати надмірність «N + 1» кожної окремої групи ДБЖ.

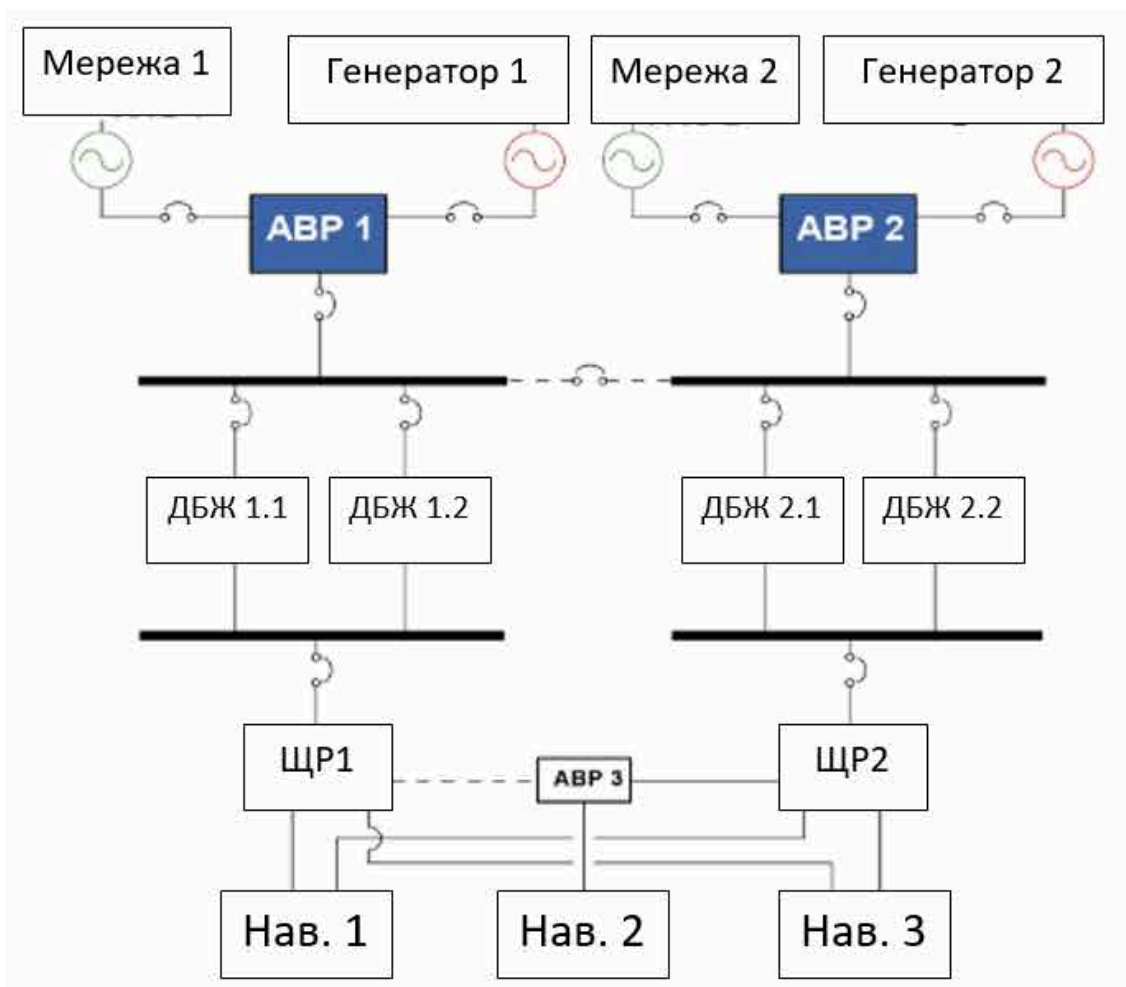


Рис.4.4. Схема конфігурація 2N (система+система)

Виклики та обмеження

Впровадження резервування в системах електропостачання створює низку проблем і обмежень, з якими організації повинні ретельно орієнтуватися. Ці проблеми можуть значно вплинути на загальну надійність і ефективність використаних стратегій резервування.

Комплексність і надійність

Однією з головних проблем, пов'язаних із резервуванням, є складність, яку вона додає системі. Хоча резервування має на меті підвищити надійність, воно може ненавмисно призвести до зниження надійності через збільшення

потенціалу точок збою. Складні системи можуть постраждати від зневаги з боку людини, оскільки оператори можуть вважати, що резервування автоматично запобігатиме збоям, які потенційно призведуть до порушення регулярного технічного обслуговування або моніторингу.

Крім того, введення кількох компонентів може створити взаємозалежності, які ускладнять процеси усунення несправностей і ремонту.

Час відновлення

Резервні системи також можуть мати затримку у відновленні під час збоїв. Наприклад, у конфігураціях пасивного резервування час, який потрібен резервній системі для включення після збою основної системи, може бути значним, що може бути неприйнятним у критично важливих середовищах.

Ця затримка не тільки ставить під загрозу продуктивність системи, але також може призвести до фінансових наслідків через простой роботи.

Розгляд вартості

Хоча резервування часто розглядається як засіб підвищення стійкості системи, воно не позбавлене економічних наслідків. Початкові інвестиції для впровадження резервних систем можуть бути невеликими, але поточні експлуатаційні витрати, такі як обслуговування та тестування резервних компонентів, можуть накопичуватися з часом. Крім того, організації повинні збалансувати ці витрати з вигодами, отриманими від підвищення надійності, часто вимагаючи детального аналізу витрат і вигод для прийняття обґрунтованих рішень.

Екологічні та операційні ризики

Резервні системи не захищені від екологічних та операційних ризиків. Географічне резервування — це поширена стратегія, яка використовується для захисту даних і джерел живлення від стихійних лих і політичної нестабільності.

Однак цей підхід також тягне за собою додаткові логістичні проблеми та витрати. Крім того, можуть виникнути такі робочі проблеми, як перегрів або перевантаження, особливо якщо резервні системи не контролюються належним чином або не обслуговуються, що може ще більше посилити фактори ризику, пов'язані з резервуванням.

Компроміси в проектуванні системи

При проектуванні систем електропостачання з резервуванням організації повинні орієнтуватися на різні компроміси. Хоча збільшення резервування може підвищити надійність системи, воно також може створити додаткові точки відмови, ускладнити роботу та збільшити витрати. Завдання полягає в досягненні балансу, який відповідає толерантності організації до ризику, цільовим показникам безвідмовної роботи та загальним операційним цілям.

Зрештою, особи, які приймають рішення, повинні зважити потенційні переваги резервування та його обмеження та проблеми, щоб розробити оптимальні рішення для своїх конкретних умов.

Майбутні тенденції

Ландшафт систем електропостачання зазнає суттєвих змін під впливом технологічного прогресу, змін у політиці та зміни споживчих вимог. Оскільки країни прагнуть до декарбонізації, очікується, що інтеграція змінних відновлюваних джерел енергії (VRE), таких як вітрові та сонячні фотоелектричні, значно зросте. Ця зміна спрямована не лише на покращення генерації, але й на підвищення безпеки електроенергії та зменшення залежності від викопного палива.

Потреба в гнучкості в енергосистемах стає критичною, оскільки ці змінні джерела є несинхронними та не сприяють інерції системи, вимагаючи розширених стратегій прогнозування та підтримки для ефективного управління їх переривчастістю.

Технологічні інновації

Новітні технології відіграють ключову роль у підвищенні ефективності та надійності енергосистем. Такі інновації, як напівпровідники з широкою забороненою зоною та нові топології, розширюють межі операційної ефективності, а прогрес у технологіях зберігання та реагування на вимоги забезпечує таку необхідну гнучкість.

Розвиток інтелектуальних мереж, які використовують цифрові технології, забезпечує більш активну роль споживачів і сприяє більшій взаємозв'язку ринку, роблячи систему більш стійкою до збоїв у постачанні.

Участь споживачів і децентралізація

У міру розвитку енергетичних систем очікується, що участь споживачів зростатиме завдяки прогресу цифрових технологій. Тенденція до децентралізації дозволить споживачам активно брати участь в енергетичному ринку, впливаючи як на динаміку попиту, так і пропозиції. Ця зміна потребує жорстких політик і правил для підтримки безпеки системи та достатності ресурсів.

Крім того, передбачається, що посилення електрифікації таких секторів, як транспорт і опалення, призведе до значного зростання попиту на електроенергію, що приділить більшу увагу забезпеченню надійності систем постачання.

4.3. Роль УЗЕ в цифровій підстанції та оптимізація навантажень

Алгоритми керування навантаженням є важливими інструментами для оптимізації енергоспоживання та забезпечення стабільності та надійності електромереж. Ці алгоритми поділяються на дві основні категорії: статичні та динамічні алгоритми керування навантаженням. Статичні алгоритми працюють за заздалегідь визначеними правилами та не мають адаптації в

реальному часі, тоді як динамічні алгоритми підлаштовуються під поточний стан енергетичної системи, підвищуючи ефективність і швидкість реакції. Оскільки попит на рішення для управління енергією зростає на тлі збільшення споживання енергії та інтеграції відновлюваних джерел, оптимізація цих алгоритмів стала критично важливою для дослідників і практиків.

Важливість алгоритмів керування навантаженням полягає в їх здатності покращувати енергоефективність, знижувати експлуатаційні витрати та підтримувати надійність мережі. Такі методи, як перемикання навантаження, яке заохочує споживачів регулювати споживання в періоди непікової навантаження, є життєво важливими для збалансування попиту на електроенергію, особливо в години пік.

Однак реалізація цих алгоритмів стикається з проблемами, включаючи потребу в розвиненій інфраструктурі, зміни поведінки споживачів і баланс між комфортом і енергозбереженням. Ці виклики можуть вплинути на ефективність стратегій керування навантаженням і перешкодити повній реалізації їхніх потенційних переваг.

На додаток до традиційних методів оптимізації, останні досягнення запровадили машинне навчання та штучний інтелект, які підвищують точність і адаптивність систем керування навантаженням. Ці сучасні методи полегшують аналіз даних у режимі реального часу, дозволяючи більш детально реагувати на коливання потреб в енергії та наявності ресурсів. Інтеграція оптимізації за допомогою штучного інтелекту ще більше розширила можливості алгоритмів керування навантаженням, зробивши їх більш ефективними та чутливими до змін умов.

У міру розвитку енергетичних систем майбутні тенденції в управлінні навантаженнями все більше наголошуватимуть на важливості залучення споживачів, конфіденційності даних та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Розвиток інтелектуальних мереж, що триває, відіграватиме ключову

роль у формуванні цих алгоритмів, забезпечуючи моніторинг у реальному часі та автоматизоване реагування на потреби в енергії, таким чином сприяючи створенню більш сталого та стійкого енергетичного ландшафту.

У сучасному швидкоплинному світі ефективне та стійке використання енергії стало критичною проблемою. Управління навантаженням відіграє важливу роль в оптимізації споживання енергії та забезпеченні надійної роботи електричних мереж.

Управління навантаженням означає стратегічне управління попитом на електроенергію, щоб узгодити його з наявною пропозицією. Ефективно керуючи піковим попитом і коливаннями навантаження, підприємства та комунальні послуги можуть уникнути дорогих відключень електроенергії, зменшити втрати енергії та знизити експлуатаційні витрати.

Однак управління навантаженням також представляє власний набір проблем, таких як підтримання тонкого балансу між попитом і пропозицією, адаптація до змінних профілів навантаження та інтеграція відновлюваних джерел енергії в мережу.

Перенесення навантаження

Зміщення навантаження передбачає навмисне коригування моделей споживання електроенергії для перенесення пікового попиту на періоди нижчого попиту на енергію. Ця техніка допомагає зменшити навантаження на електричну мережу в години пік, одночасно сприяючи енергоефективності та економії коштів. Перерозподіляючи споживання енергії протягом дня, перенесення навантаження може сприяти стабільнішій та стійкій енергетичній системі.

Існує кілька способів перенесення навантаження:

1. Перенесення навантаження в залежності від часу

Ця технологія передбачає перенесення споживання електроенергії на непікові години, коли потреба в енергії нижча. Наприклад, компанії можуть

запланувати несуттєві завдання або роботу обладнання на ніч або вихідні, коли тарифи на електроенергію зазвичай нижчі. Це допомагає зменшити піковий попит і знизити витрати на електроенергію.

2. Зміщення навантаження на основі температури

Ця техніка спрямована на налаштування систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) для оптимізації споживання енергії. Злегка відкоригувавши задані значення температури або реалізувавши стратегії попереднього охолодження або попереднього нагрівання, споживання енергії можна перенести на часи, коли потреба в енергії буде нижчою, без шкоди для рівня комфорту.

3. Перенесення навантаження на основі процесу

Цей метод передбачає оптимізацію енергоємних процесів для мінімізації споживання електроенергії в періоди пікового попиту. Наприклад, промислові підприємства можуть коригувати виробничі графіки, щоб уникнути високого споживання енергії в години пік або впровадити енергоефективні технології, які зменшують потреби в електроенергії.

Перенесення навантаження має кілька переваг:

- Зменшення витрат на електроенергію: перенесення споживання енергії на години непікової навантаження може скористатись нижчими тарифами на електроенергію, що призведе до економії коштів для підприємств і споживачів.

- Стабільність мережі: завдяки зниженню пікового попиту переміщення навантаження допомагає підтримувати стабільність мережі та зменшує ризик знеструмлення або відключення.

- Енергоефективність: перемикання навантаження заохочує ефективне використання електроенергії, що призводить до зниження загального споживання енергії та впливу на навколишнє середовище.

Впроваджуючи методи розподілу навантаження, компанії та окремі особи можуть зробити свій внесок у створення більш сталого енергетичного

майбутнього, одночасно користуючись перевагами економії коштів і надійності мережі. Однак важливо враховувати конкретні потреби та обмеження кожної ситуації, щоб забезпечити успішні стратегії перенесення навантаження.

Зниження пікового навантаження

Зниження пікового навантаження означає навмисне зменшення споживання електроенергії в періоди високого попиту, особливо в години пік. Він відіграє вирішальну роль у підтримці стабільності мережі та уникненні відключень електроенергії. Впроваджуючи ефективні стратегії зниження пікового навантаження, підприємства та комунальні служби можуть зменшити навантаження на електричну мережу та забезпечити надійне та стале енергопостачання.

Існують три основні техніки зниження пікового навантаження:

1. Програми реагування на попит

Ці програми передбачають стимулювання споживачів до зменшення споживання електроенергії в періоди пікового попиту. Учасники можуть добровільно регулювати споживання енергії або дозволити комунальному підприємству дистанційно керувати певними приладами чи обладнанням. Активно керуючи попитом, комунальні підприємства можуть ефективно зменшити пікове навантаження та збалансувати попит і пропозицію електроенергії.

2. Системи накопичення енергії

Технології зберігання енергії, такі як батареї, відіграють значну роль у зниженні пікового навантаження. У періоди низького попиту надлишок енергії накопичується в батареях. Коли попит зростає, накопичена енергія розряджається для задоволення збільшеного навантаження, зменшуючи залежність від мережі та пом'якшуючи піковий попит.

3. Розподілена генерація

Розподілена генерація означає виробництво електроенергії в точці споживання або поблизу неї. Він передбачає використання невеликих джерел електроенергії, таких як сонячні панелі або невеликі вітряні турбіни. Виробляючи електроенергію локально, розподілена генерація зменшує навантаження на мережу в години пік і сприяє зниженню пікового навантаження.

Управління попитом

Управління попитом (DSM) відноситься до стратегічного планування та впровадження заходів для впливу та управління споживанням електроенергії споживачем. DSM має на меті оптимізувати споживання енергії, зменшити пікове споживання та підвищити загальну енергоефективність. Зосереджуючись на поведінці споживачів і моделях споживання енергії, DSM пропонує цілісний підхід до управління енергією.

Існує кілька методів і стратегій управління попитом:

1. Енергоефективні заходи

Підвищення енергоефективності за допомогою таких практик, як енергоефективне освітлення, ізоляція та модернізація приладів, може значно зменшити загальне споживання енергії. Пропагуючи енергоефективні технології та навчаючи споживачів звичкам енергозбереження, DSM заохочує стале використання енергії.

2. Контроль і скорочення навантаження

Контроль навантаження передбачає можливість дистанційного контролю та регулювання споживання електроенергії в періоди пікового попиту. Цього можна досягти за допомогою ціноутворення за часом використання, коли споживачі платять різні ставки залежно від часу доби. Обмеження означає добровільне скорочення споживання електроенергії в критичні періоди, яке стимулюється програмами реагування на попит.

3. Технології Smart Grid

Технології Smart Grid забезпечують двосторонній зв'язок між комунальними підприємствами та споживачами, полегшуючи обмін даними в реальному часі та забезпечуючи можливості реагування на попит. Інтелектуальні лічильники, наприклад, надають детальну інформацію про споживання, що дозволяє споживачам більш ефективно контролювати та керувати споживанням енергії.

Управління попитом пропонує кілька переваг і стикається з певними проблемами:

Переваги

- Зменшення витрат на електроенергію: DSM може призвести до зменшення рахунків за електроенергію завдяки заходам з енергоефективності та програмам реагування на попит, які стимулюють використання в непіковий період.

- Підвищена надійність мережі: завдяки зниженню пікового навантаження DSM сприяє стабільності мережі, зменшуючи ризик знеструмлення та покращуючи стійкість системи.

- Екологічна стійкість: DSM сприяє енергозбереженню, що допомагає зменшити викиди парникових газів і підтримує цілі сталого розвитку енергії.

Виклики

- Зміна поведінки: заохочення споживачів до впровадження практик енергозбереження та участі в програмах реагування на попит потребує обізнаності, освіти та стимулів для зміни поведінки.

- Вимоги до інфраструктури: Впровадження технологій інтелектуальної мережі та розгортання розширеної інфраструктури вимірювання може потребувати значних інвестицій та модернізації існуючих систем.

- Збалансування споживчого комфорту та енергозбереження: ініціативи DSM мають знайти баланс між енергоефективністю та підтримкою споживчого комфорту та задоволеності.

Незважаючи на труднощі, управління попитом відкриває величезні можливості для енергозбереження та економії коштів. Впроваджуючи заходи з енергоефективності, дозволяючи контролювати навантаження та використовуючи технології розумних мереж, підприємства та споживачі можуть брати активну участь у формуванні більш сталого енергетичного майбутнього, насолоджуючись перевагами зниження витрат на енергію та більш надійної мережі.

Балансування навантаження

Балансування навантаження передбачає справедливий розподіл попиту на електроенергію в електричній мережі для забезпечення оптимального використання ресурсів і підтримки стабільності мережі. Основними цілями балансування навантаження є уникнення перевантаження окремих частин мережі, мінімізація ризику знеструмлення та оптимізація використання доступного джерела енергії.

Існує кілька методів балансування навантаження:

1. Скидання навантаження

Відключення навантаження - це контрольоване та тимчасове зменшення постачання електроенергії до певних районів або споживачів у періоди високого попиту. Звільняючи некритичні навантаження або віддаючи пріоритет основним послугам, розподіл навантаження допомагає збалансувати рівняння попиту та пропозиції та запобігти нестабільності мережі.

2. Агрегація навантаження

Агрегація навантажень передбачає групування кількох менших навантажень разом для створення більшого, більш керованого навантаження. Ця техніка дозволяє більш ефективно розподіляти та використовувати наявні енергетичні ресурси. Наприклад, об'єднання попиту на електроенергію кількох домогосподарств або малих підприємств може створити профіль навантаження, який легше балансувати та керувати.

3. Вирівнювання навантаження

Вирівнювання навантаження має на меті згладити коливання попиту на електроенергію шляхом перенесення частини пікового навантаження на періоди, що не є піковими. Цей метод передбачає активне керування споживанням енергії, щоб мінімізувати різкі стрибки попиту та забезпечити більш послідовний і керований профіль навантаження.

Сучасна цифрова підстанція використовує інтелектуальні пристрої та цифрові протоколи (наприклад, IEC 61850) для моніторингу й керування в реальному часі. Інтеграція у таку підстанцію системи накопичення енергії (УЗЕ) дозволяє гнучко балансувати навантаження: батареї заряджаються в моменти надлишку потужності (наприклад, уночі чи при максимальній генерації СЕС) і розряджаються під час пікових навантажень, зменшуючи імпорт з магістральної мережі. Такий підхід забезпечує зниження навантаження в пікові години (peak shaving), стабілізацію напруги та частоти, а також функцію аварійного резерву. Зазначимо, що цифрова підстанція підтримує інтеграцію відновлюваних джерел та накопичувачів, а швидке обмін інформацією й аналітика дозволяють приймати рішення в реальному часі.

Логіка керування навантаженнями. Енергоменеджмент-система (EMS) є ключовим “мозком” мікромережі підстанції. Вона збирає дані про поточне споживання, прогноз погоди і генерації СЕС, тарифи та рівень заряду УЗЕ, і на їх основі приймає рішення про перемикання джерел. Наприклад, EMS може завчасно заряджати УЗЕ у нічні години чи вночі при низькому тарифі, а розряджати його в години високого попиту. При цьому пріоритет віддається тим енергоресурсам, які оптимально вирівнюють навантаження та забезпечують найнижчу вартість енергії. У разі виявлення перевантаження або несправності EMS оперативно активує УЗЕ, перерозподіляючи енергію між мережею, СЕС і батареєю згідно з алгоритмом управління. Наприклад:

- ніч та міжпікові години: УЗЕ заряджається, використовуючи дешевшу енергію (з мережі або надлишок з СЕС), щоб накопичити ресурс перед піковим навантаженням.

- Пікові години дня/вечора: СЕС генерує максимум енергії, яка спочатку обслуговує місцеве навантаження, надлишок спрямовується на заряд УЗЕ. Якщо попит перевищує доступну СЕС потужність, УЗЕ підтримує навантаження, розряджаючись. Це зменшує пікові навантаження на зовнішню мережу.

- Аварійні умови: У разі інциденту EMS негайно реагує, здійснюючи перемикання на резервні джерела. Система може автоматично ізолювати підстанцію від мережі (переключитися в автономний режим) і забезпечити безперебійне живлення критичних навантажень із використанням УЗЕ і СЕС. Наприклад, алгоритм може ухвалити рішення про заряд УЗЕ під час низького попиту або розряд у разі відхилення від нормальної роботи, керуючи цим згідно із заданими політиками балансу навантаження і вартістю електроенергії.

Сценарії повного і часткового відключення мережі

У разі аварійного відключення (часткового або повного) EMS координує перехід підстанції в ізолюваний режим. Система негайно відключає неважливі навантаження і переводить УЗЕ та СЕС у режим аварійного живлення. Згідно з налаштуваннями EMS, реалізується пріоритетне живлення критичних споживачів і поступове підключення інших. Наприклад:

- Автоматизоване управління (EMS): EMS фіксує втрату мережевої напруги і керує ізоляцією підстанції («автономний режим»). За допомогою інтелектуальних ключів/вимикачів система відокремлює ділянку та переводить УЗЕ і СЕС на живлення власних ланок. Метою є збереження балансу енергії й уникнення перенавантажень під час аварії. Такий режим підвищує надійність системи: завдяки перейманню управління локальною

мікромережею підстанція може підтримувати живлення критичних споживачів в автономії.

- Пріоритет живлення (споживач 3, 25 кВт): В EMS задано, що під час аварії насамперед живиться споживач із найвищим пріоритетом (у нашому випадку «Споживач 3» 25 кВт). EMS забезпечує його безперервне живлення за будь-яких доступних ресурсів (розряд батареї, генерація СЕС), навіть якщо доводиться відключити або обмежити менш важливі споживачі. Таким чином, пріоритетні навантаження залишаються під живленням, а другорядні можуть бути вимкнені для економії заряду УЗЕ.

- Реакція УЗЕ на короточасні перетоки напруги: Під час імпульсних просідань або стрибків напруги УЗЕ працює як швидкодіючий резерв (аналог UPS). Він миттєво підхоплює навантаження, компенсує коливання напруги і забезпечує безперебійність живлення критичних споживачів. Завдяки цьому найважливіші ланки продовжують працювати під час коротких перебоїв у мережі, а EMS координує повернення мережевого живлення після стабілізації.

- Режим чорного пуску (повне знеструмлення): Якщо зовнішнє джерело повністю відсутнє, EMS ініціює чорний пуск локальної мікромережі. У цьому випадку УЗЕ виступає формувальним джерелом напруги («grid-forming»): він запускається автономно (з власним резервним живленням) і відновлює напругу для критичних навантажень. СЕС за необхідності підживлює УЗЕ під час запуску, поповнюючи акумуляторний запас. Після стабілізації напруги EMS поступово підключає пріоритетні навантаження до автономного живлення, а менш критичні – заощаджуючи ресурс батареї. У цілому, така взаємодія УЗЕ, СЕС і EMS у реальному часі забезпечує безаварійний перехід підстанції в автономний режим і стабільне живлення у разі довготривалого знеструмлення.

У всіх згаданих сценаріях EMS відіграє вирішальну роль: саме ця система реалізує алгоритми плавного перемикання, розподілу пріоритетів та аварійного управління. Застосування EMS на рівні цифрової підстанції є типовою практикою Smart Grid, що забезпечує автоматизоване балансування попиту і генерації, підвищує гнучкість мережі та скорочує час відновлення живлення після збоїв.

4.4. Висновок до розділу 4

УЗЕ в поєднанні з EMS та СЕС формує інтелектуальну систему енергозабезпечення цифрової підстанції. EMS координує роботу всіх джерел і споживачів, забезпечуючи оптимальний режим роботи (мінімізацію витрат і забезпечення необхідних навантажень) за змінного профілю споживання, часу доби та аварійних умов. Практика Smart Grid демонструє, що таке рішення підвищує надійність і стійкість енергопостачання: у разі збоїв мережі побудова локальної мікромережі з УЗЕ і керуючим EMS дозволяє швидко провести її ізоляцію й автономне живлення критичних споживачів.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено аналіз стандартів цифрових підстанцій з акцентом на протокол IEC 61850. Показано, що IEC 61850 використовує самоописні об'єктно-орієнтовані моделі даних і комунікаційні протоколи (GOOSE, MMS, SMV), що забезпечують роботу систем захисту і автоматики з гарантованим часом реакції.

У другому розділі в результаті аналізу концепцій цифрових підстанцій та стандартів, що їх регламентують, встановлено, що впровадження цифрових технологій в енергетичну інфраструктуру забезпечує суттєве підвищення ефективності, надійності та безпеки електропостачання.

У третьому розділі наведено моделювання сценарію з інтеграцією батарейної системи Huawei LUNA2000 (500 кВт, 2000 кВт·год) в мікромережу з доданими споживачами.

Максимальна ємність УЗЕ — 2 000 кВт·год (2 МВт·год), що дозволяє накопичити до 100% профіцитної генерації від СЕС (до 1100 кВт·год у сонячний день).

Тривалість автономного живлення для стратегічного споживача (25 кВт) — до 40 годин при повному заряді системи.

Тип акумуляторів — літій-залізо-фосфат (LFP), що забезпечує понад 5000 циклів заряду/розряду (≈ 13 – 15 років щоденного використання) при ефективності понад 95%.

Можливість вечірнього живлення: УЗЕ може покрити понад 75% критичних вечірніх навантажень (зокрема 300–400 кВт·год від Споживача 2 та Споживача 5).

Автономне живлення для всіх споживачів протягом 8,5 годин.

Автономна робота з СЕС – 57,1 год.

Четвертий розділ демонструє, що комплексне впровадження цифрової підстанції з накопичувачами суттєво підвищує енергоефективність та гнучкість управління потоками енергії. Система енергоменеджменту (EMS) координує роботу усіх джерел та споживачів, оптимізуючи розподіл електроенергії, зменшуючи втрати і балансуючи генерацію та споживання. Це дозволяє підтримувати оптимальні режими роботи в різних умовах.

В даній роботі досліджено можливість інтеграції УЗЕ в схему мережі 10кВ. Враховуючи сучасний енергетики в Україні, попит на встановлення відновлюваних джерел енергії – інтеграція в наші мережі УЗЕ це можливість розвантажити енергосистему, акумуюючи надлишкову енергію і віддаючи її в пікові періоди.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мінерговугілля України «Правила улаштування електроустановок». Київ. 2017., 760с.

2. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Схвалено розпорядженням Каб. Мін. України від 24.07.2013 №1071.

3. В.А. Маляренко. Енергетичні установки. Загальний курс: Навчальний посібник. 2-е видання. Харків. «Видавництво САГА», 2008р., 320 с.

4. І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, С.Я. Вишневецький. Міністерство освіти і науки України криворізький національний університет. Аспекти якості електроенергії в мережах живлення. Навчальний посібник. Кривий Ріг, 2022р., 168с.

3. В.А. Голуб. Підключення установки зберігання енергії до мережі 110 кВ, магістерська дис.: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньо-професійна програма «Електричні системи і мережі». Київ, 2024р., 92 с.

1. Відмова в обслуговуванні (DoS) на автоматизовану систему підстанції на основі IEC 61850: критична кіберзагроза для шляхів розвитку цифрових підстанцій. [Ел.рес.]. -Режим доступу:

https://www.academia.edu/65887347/Denial_of_Service_Attack_on_IEC_61850_Based_Substation_Automation_System_A_Crucial_Cyber_Threat_towards_Smart_Substation_Pathways.

2. Посібник з проектування автоматизації підстанцій. Нова цифрова підстанція. [Ел.рес.]. -Режим доступу:

<https://controlsoft.ca/substation-automation/substation-automation-design-guide-the-new-digital-substation/>

3. Опанування ІЕС 61850. Вичерпний посібник з автоматизації підстанцій. [Ел.рес.]. -Режим

<https://www.electrical-blog.com/mastering-iec-61850-a-comprehensive-guide/>

4. Основи цифрових підстанцій. [Ел.рес.]. -Режим доступу:

<https://www.sgrwin.com/digital-substations-the-fundamentals/>

5. Тренди цифрових підстанцій у 2025 році. [Ел.рес.]. -Режим доступу:

<https://www.sphericalinsights.com/blogs/top-10-digital-substation-trends-in-2025-explore-more-with-spherical-insights>

6. Вирішення проблем управління обладнанням цифрових підстанцій.

[Ел.рес.]. -Режим доступу:

<https://electricenergyonline.com/energy/magazine/208/article/Meeting-the-Challenges-of-Managing-Substation-Equipment-Assets.htm>.

7. Розширений посібник з електричної підстанції: проектування, компоненти та експлуатація. [Ел.рес.]. -Режим доступу:

<https://paktechpoint.com/electrical-substation-advanced-guide-design-components-and-operations/>

8. Основні компоненти електричної підстанції. [Ел.рес.]. -Режим доступу:

<https://forumelectrical.com/essential-components-of-an-electrical-substation>.

9. Промислові протоколи, основи ІЕС 61850. [Ел.рес.]. -Режим доступу:

<https://www.racoman.com/blog/industrial-protocols/fundamentals-of-iec-61850>

10. Проблеми впровадження систем автоматизації підстанцій на основі ІЕС61850. [Ел.рес.]. -Режим доступу:

https://www.academia.edu/102529195/Implementation_issues_with_iec_61850_based_substation_automation_systems

11. Розумна система енергозбереження Huawei Luna2000 Smart String. [Ел.рес.]. -Режим доступу:

<https://www.photomate.eu/huawei-smart-string-ess-solution>

12. Система накопичення енергії Huawei LUNA2000-2.0MWH-2H1.
[Ел.рес.]. -Режим доступу:

<https://www.sig.energy/product/systema-nakopychennya-energiyi-huawei-luna2000-2-0mwh-2h1/>

13.Цифровізація та енергетика. [Ел.рес.]. -Режим доступу:
<https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>

14. Як цифрові технології забезпечують стале використання енергії.
[Ел.рес.]. -Режим доступу:
<https://www.siemens-advanta.com/blog/technology-digitalization-sustainable-future>

15. Резервні джерела живлення. [Ел.рес.]. -Режим доступу:
<https://www.electronicdesign.com/technologies/power/power-supply/article/21754915/redundant-power-supplies-prevent-system-downtime>

16. Мінерговугілля України «Правила улаштування електроустановок».
Київ. 2017., 760с.

17. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Схвалено
розпорядженням Каб. Мін. України від 24.07.2013 №1071.

18. В.А. Маляренко. Енергетичні установки. Загальний курс:
Навчальний посібник. 2-е видання. Харків. «Видавництво САГА», 2008р.,
320 с.

19. І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, С.Я. Вишневецький. Міністерство освіти і
науки України криворізький національний університет. Аспекти якості
електроенергії в мережах живлення. Навчальний посібник. Кривий Ріг,
2022р., 168с.

20. В.А. Голуб. Підключення установки зберігання енергії до мережі 110
кВ, магістерська дис.: 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка, освітньо-професійна програма «Електричні системи і
мережі». Київ, 2024р., 92 с.