

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Войтович Вадим Ігорович

УДК 621.311.2

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Перспективи розвитку систем захисту та керування енергосистемами
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Войтович В.І.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський О.Ф.
(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Войтович В.І. Перспективи розвитку систем захисту та керування енергосистемами. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

У сучасних умовах зростаючої складності енергетичних систем та зростаючих вимог до їх надійності і ефективності виникає нагальна потреба вдосконалення засобів захисту та керування. Робота присвячена огляду перспектив розвитку систем захисту та керування енергосистемами, зосереджуючись на інтеграції цифрових технологій, розподілених джерел енергії та інтелектуальних алгоритмів.

Ключові слова: енергетичні системи, розумні мережі, системи моніторингу, алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту.

ABSTRACT

Voytovych V.I. Prospects for the development of protection and control systems for power systems. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

In the current context of increasing complexity of power systems and growing demands for their reliability and efficiency, there is an urgent need to improve protection and control means. The work is devoted to reviewing the prospects for the development of protection and control systems for power systems, focusing on the integration of digital technologies, distributed energy resources, and intelligent algorithms.

Keywords: power systems, smart grids, monitoring systems, machine learning and artificial intelligence algorithms.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ТЕНДЕНЦІЇ ТА ЕВОЛЮЦІЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ, АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	7
1.1 Традиційний захист (початок ХХ ст. — ~1970)	8
1.2 Перехідний період / Сучасний захист (1970–1990)	8
1.3 Нові розробки (1990–2020)	10
1.4 Перехідні теми та сучасні практичні поради	12
Висновок до першого розділу	12
РОЗДІЛ 2 ІНТЕГРОВАНІЙ ШИРОКОЗОННИЙ - РЕГІОНАЛЬНИЙ ЗАХИСТ І КЕРУВАННЯ	14
2.1 Архітектура інтегрованого захисту й управління широкого охоплення	14
2.2 Багатофункціональне інтелектуальне обладнання на місцевому рівні	16
2.3 Інтегрований захист і керування підстанцією на рівні підстанції/установки	15
2.4 Інтегрований широко зонний/регіональний захист та управління	17
2.5 Синхронізована високошвидкісна комунікаційна мережа	16
2.6 Синхронізована інформаційна платформа	18
Висновок до другого розділу	19
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ПОТОКУ В ГІБРИДНІЙ МЕРЕЖІ РОЗПОДІЛУ ЗМІННОГО/ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МАРШРУТИЗАТОРА	22
3.1 Показники оцінювання роботи мережі змінного/постійного струму.	23
3.2 Обмеження розрахунку потоків потужності	23
Висновок до третього розділу	27
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	30

ВСТУП

Сьогодні енергетичні системи стикаються зі зростаючими викликами, які спонукають їх до розвитку в інтелектуальні мережі. Численні виклики включають: досягнення цілей вуглецевої нейтральності, електрифікацію кінцевих споживачів та перехід енергії на відновлювані джерела енергії. Інтеграція розподілених енергетичних ресурсів (PER) як на рівні середньої напруги (СН), так і низької напруги (НН) активно трансформує традиційну централізовану конструкцію енергетичних систем; від переважно статичної, односпрямованої мережі до мережі, що підтримує двонаправлених потоки енергії та інформації між різними енергетичними учасниками з набагато швидшою динамікою роботи та обмеженою передбачуваністю. Таким чином, підтримка балансу попиту та пропозиції та уникнення перевантаження мережі стає складнішим завданням зі значним невизначеністю [1].

З розвитком енергосистеми впровадження нових удосконалених систем захисту, автоматизації та керування (РАС), що підтримують її роботу, стає необхідністю. Дослідники формально визначають системи РАС як цілісний набір функцій енергосистеми, що дозволяють захищати, автоматизувати та керувати електричною мережею, охоплюючи польові, технологічні та операційні зони. Прикладами є контролер напруги підстанції, захист від низької/перенапруги, диференціальний захист, системи диспетчерського керування та збору даних (SCADA), контролери вітрових електростанцій тощо.

Системи РАС базуються на трьох основних компонентах, розподілених по всій енергомережі: а) Функції захисту, розташовані якомога ближче до контрольованих споруд (наприклад, лінії або трансформатора); б) Керування для скоординованих дій за допомогою локального програмного забезпечення для автоматизації/керування (наприклад, на електричній підстанції або установках DER); в) Оптимізація центром керування оператора мережі (наприклад, набір програмного забезпечення для моніторингу, системи управління), що вимагає глобального макроскопічного системного огляду.

Однак можливість масової інтеграції DER рідка розглядалася під час проектування традиційних схем РАС з обмеженою координацією між трирівнева ієрархією систем РАС. Це могло призвести до кількох каскадних подій, спричинених несправністю на рівні високої напруги (HV) та небажаним спрацьовуванням захистів DER. Наприклад, нещодавня подія навколо Лондона у 2019 році призвела до відключення приблизно 1,1 мільйона споживачів, причому багато генераторів DER відключилися через неефективні налаштування та механізми захисту (наприклад, через низьку напругу) [2] .

Актуальність дослідження полягає у необхідності модернізації систем захисту та керування енергосистемами, зумовленої їхньою зростаючою складністю, інтеграцією розподіленої генерації, накопичення енергії та інших сучасних технологій. Традиційні рішення стають неефективними, а інтеграція цифрових і мережевих технологій є ключовим фактором для підвищення швидкості реагування, точності локалізації дефектів, адаптивності та загальної надійності енергосистем.

Основна мета дослідження – розробка та аналіз інтегрованої системи широкої зони/регіонального захисту й керування (IWAPC), яка поєднує в собі локальне обладнання, підстанційний захист, високошвидкісну комунікаційну мережу та синхронізовану інформаційну платформу. Метою є створення масштабованої, синхронізованої та резервованої системи, здатної ефективно працювати в умовах сучасних складних енергосистем.

Об'єктом дослідження є процес еволюції та функціонування систем захисту та керування енергосистемами, від апаратно-механічних рішень до інтегрованої цифрової архітектури.

Предметом дослідження є структурні елементи, алгоритми та комунікаційні протоколи інтегрованої системи широкої зони/регіонального захисту й керування (IWAPC), а також ітеративний алгоритм розрахунку потоків потужності у гібридній мережі AC/DC, враховуючи VSC та енергетичний маршрутизатор.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Войтович В.І.

МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ АЛГОРИТМІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

2. Войтович В. І., Данильчук М. Р.

АНАЛІЗ ЧАСТКОВОГО РОЗРЯДЖЕННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

РОЗДІЛ 1

ТЕНДЕНЦІЇ ТА ЕВОЛЮЦІЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ, АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Нещодавнє зростання комунікаційних, інформаційних та мережевих технологій призвело до змін у проектуванні систем автоматики протиаварійного керування (АПК) та підтримуваних архітектури. Ця тенденція також спостерігалася в кількох попередніх дослідницьких роботах, розглянутих у наступних абзацах. В [3] провели огляд еволюції захисту та керування в енергетичних системах, охоплюючи вплив досягнень у комунікаційних, інформаційних та мережевих технологіях (як представлено на рисунку 1.1). Огляд охоплював гібридні, широко зонні (регіональні) та локальні (рівень підстанції) архітектури захисту та керування, які можна координувати для покращення продуктивності системи.

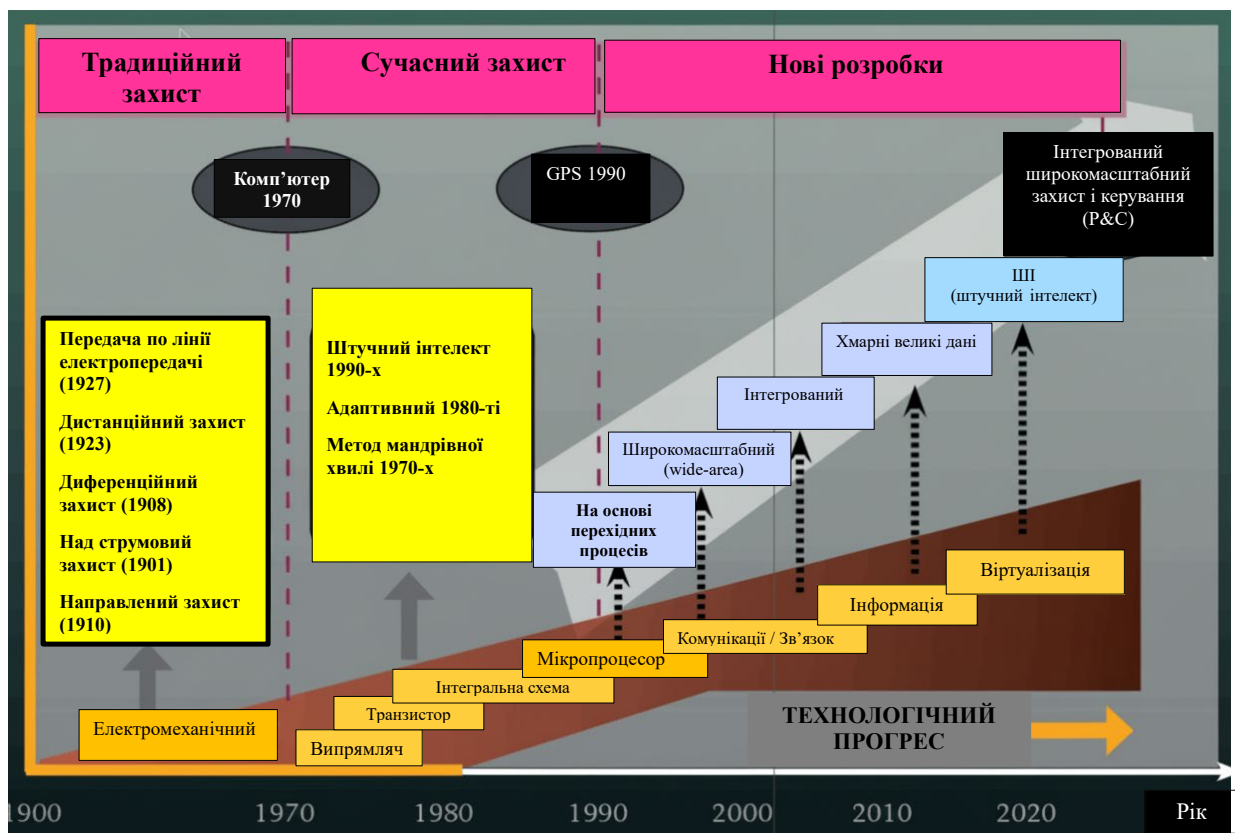


Рисунок 1.1 Історичний огляд еволюції захисту та керування в енергетичних системах

1.1 Традиційний захист (початок XX ст. — ~1970)

Основна ідея: апаратні (електромеханічні) алгоритми, робота на простих фізичних вимірюваннях (струм, напруга)[4].

Пристрої:

- Електромеханічні реле (індукційні, імпульсні): працюють за принципом електромагнітної взаємодії — котушки створюють механічний рух контакту при перевищенні порогу.

- Випрямлячі та аналітичні кола для формування сигналів.

Типові алгоритми/методи:

- Над струмовий захист (Overcurrent)[5]: спрацьовування при струмі, що перевищує налаштований поріг; варіанти — миттєвий (instantaneous), з часовою характеристикою (time-overcurrent).

- Диференційний захист (Differential): порівняння сумарних струмів На обох кінцях машини/лінії; спрацьовування при різниці понад поріг → локалізація внутрішнього замикання.

- Направлені реле (Directional)[6,7]: використовують фазовий зсув між струмом і напругою або потоком потужності для визначення напрямку струму; важливі для розгалужених мереж і захисту ліній.

- Дистанційний захист (Distance/Impedance): визначає імпеданс до місця замикання за виміряними U-I; зонні настройки (перша зона — ближня, друга — дальша)[8].

Обмеження й особливості:

- Мала точність вимірів, великі механічні затримки.
- Потребують частих регулювань під час зміни схем мережі.
- Локальний характер — слабка координація між різними захисними пристроями.

1.2 Перехідний період / Сучасний захист (1970–1990)

Основна ідея: впровадження електроніки, мікропроцесорного оброблення сигналів, перехід від механіки до цифрових рішень.

Пристрої:

- Мікропроцесорні релейні пристрої (цифрові реле): вбудовані АЦП і процесор для обробки сигналів[9].
- Прилади вимірювання синхронного положення (перетворювачі), первинна апаратура з кращими сенсорами.

Технологічні основи:

- Транзистори → інтегральні схеми → мікропроцесори: збільшили швидкість обробки, зменшили розміри і енергоспоживання.

Типові алгоритми/функції:

- Обробка сигналів (DSP): цифрова фільтрація, гармонічний аналіз, визначення фазового кута.
- Планування методом набігаючої хвилі (Rolling Wave Planning) хвилі при замиканні за допомогою високочастотних секцій; дає дуже високу точність локалізації дефекту на великій швидкості (корисно для довгих високовольтних ліній[10].
- Адаптивні алгоритми (Adaptive, 1980-ті): само адаптація налаштувань реле під зміну робочого режиму мережі (наприклад, зміна джерел живлення або конфігурації мережі)[11].
- Поліпшені реалізації дистанційного й диференційного захисту в цифровому виконанні (цифровий диференціал, цифрові трансформатори струму із компенсацією хвиль).

Практичні приклади:

- Мікропроцесорне реле для трансформатора: цифрова діагностика, вбудований журнал подій, багато режимні захисти (ІО, diff, angle).
- Захист ліній з методом TW: застосовується для ліній великої довжини, коли електромагнітні фронти використовують для дуже швидкої детекції.

Переваги:

- Швидкість, точність, діагностика, легування подій.

- Можливість оновлення алгоритмів через прошивку.

Виклики:

Потреба в якісних сенсорах і синхронізації, електромагнітна сумісність, перехідна ера — сумісність з існуючими механічними апаратами.

1.3 Нові розробки (1990–2020)

Основна ідея: інтеграція захисту, зв'язку й інформаційних технологій; перехід до мережевого, координаційного підходу.

Ключові технології:

- GPS/Синхронні вимірювання (PMU — Phasor Measurement Units)[12]: точна часово-фазова синхронізація по GPS дозволяє визначати фазові кути по всій мережі одночасно — wide-area monitoring/protection.
- Комунікаційні протоколи (IEC 61850, GOOSE, MMS): стандарти для взаємодії релей і систем управління в реальному часі[13].
- Хмарні обчислення та Big Data: централізований збір подій/телеметрії та їх аналітика[14].
- Віртуалізація: віртуальні пристрої/функції захисту (NFV/SDN-подібні підходи в енергетиці)[15].
- ШІ та машинне навчання: виявлення аномалій, класифікація типів відмов, прогнозування зростання ризиків[16].

Типові алгоритми/функції:

- Wide-area protection / Wide-area monitoring: алгоритми, що використовують фазорні вимірювання з різних точок мережі для координації миттєвого відключення або приглушення (islanding, adaptive reclosing)[17].
- Інтегрований P&C (Protection & Control): координація команд захисту та елементів управління (переадресація ланцюгів, синхронізовані відключення)[18].
- Алгоритми на основі перехідних процесів: аналіз високочастотних компонентів для швидкої локалізації та класифікації дефектів[19].
- Алгоритми машинного навчання: класифікація типів замикань,

прогнозування відмови обладнання, виявлення кібераномалій у поведінці пристроїв[20].

Пристрої та системи:

- PMU (фа зорні вимірювачі) — синхронізовані по GPS/GLONASS; застосовуються у SCADA/EMS/PI-системах.
- Інтелектуальні електронні пристрої (IED) з підтримкою IEC 61850, GOOSE messaging: реальна часова взаємодія між реле безпосередньо через мережу.
- Системи централізованого моніторингу в хмарі / локальні Репозиторії подій з аналітикою.
- Віртуальні R&C сервіси, що виконуються на серверах/віртуальних машинах.

Практичні приклади застосування:

- Використання PMU для виявлення загрози[21] дестабілізації між вузлових кутів і миттєве коригування реактивної підтримки.
- Інтегрований захист ліній, що використовує GOOSE - повідомлення для відпрацювання швидкого відключення при виявленому внутрішньому замиканні.
- Хмарна аналітика великих даних для виявлення патернів повторюваних короткочасних замикань на певному відрізку мережі (планові ремонти) [22].
- Використання ML-моделей для диференційної діагностики між зовнішнім і внутрішнім замиканням у трансформаторі, підвищення селективності.

Переваги:

Швидке, скоординоване реагування на мережевому рівні; гнучкість і масштабованість; прогнозування несправності.

Виклики і ризики:

- Кібербезпеки (мережева взаємодія відкриває нові вектори атак).

- Залежність від комунікацій і GPS (потрібні резервні схеми синхронізації).
- Складність інтеграції обладнання різних вендорів і управління великими масивами даних.

1.4 Перехідні теми та сучасні практичні поради

Синхронізація й її резервування: Використовують GPS/GLONASS[22], але для підвищеної надійності застосовують PTP (Precision Time Protocol, IEEE 1588) як внутрішню мережеву синхронізацію.

Комунікаційні архітектури та стандарти: IEC 61850 для взаємодії IED; GOOSE для низько латентних команд; MMS/OPC UA для передачі даних в SCADA/EMS[23].

Тестування й валідація: Hardware-in-the-Loop (HIL) та Real-Time digital simulators (RTDS) застосовуються для тестування алгоритмів захисту та контролю в реальному часі.

Кібербезпеки: Сегментація мереж, аутентифікація, шифрування (TLS, IPsec), моніторинг аномалій у мережевому трафіку[24].

Висновок до першого розділу

У розділі демонструється поступовий та системний перехід від локально орієнтованих апаратно-механічних рішень до інтегрованих цифрових, мережевих і інформаційних архітектур. Історичний огляд підкреслює три ключові етапи: традиційний апаратний захист початку–середини XX століття з обмеженою точністю й локальною координацією; перехідну фазу із впровадженням мікропроцесорних реле, цифрової обробки та методів типу travelling wave, що забезпечили значне підвищення швидкості, точності й діагностики; та сучасні тенденції, коли розвиток комунікаційних і мережевих технологій дозволяє реалізувати координацію на локальному, регіональному та гібридному рівнях для підвищення стійкості й ефективності системи.

Серед досягнень виділяються цифровізація алгоритмів захисту (цифрові диференційні та дистанційні схеми), адаптивні алгоритми, синхронізація

вимірювань і можливість віддаленого моніторингу й управління. Водночас залишаються виклики: забезпечення надійної синхронізації та якості сенсорних даних, проблема сумісності нових рішень зі старою апаратурою, питання кібербезпеки та електромагнітної сумісності, а також потреба в стандартизації архітектури для координації на широкій зоні.

Отже, еволюція систем захисту та керування спрямована на інтеграцію цифрових і мережевих технологій з метою підвищення швидкості реагування, точності локалізації дефектів, адаптивності до змінного режиму роботи та загальної надійності енергосистем. Подальший розвиток вимагатиме комплексного підходу, який поєднає технічну модернізацію засобів вимірювань і реле з удосконаленням комунікаційної інфраструктури, заходів із кіберзахисту та нормативної координації.

РОЗДІЛ 2

ІНТЕГРОВАНІЙ ШИРОКОЗОННИЙ/РЕГІОНАЛЬНИЙ ЗАХИСТ І КЕРУВАННЯ

2.1 Архітектура інтегрованого захисту й управління широкого охоплення

Запропонована інтегрована система широкої зони або регіонального захисту та керування (IWAPC) [25] проілюстрована на рис. 2.1. Відбулися швидкі розробки як у мережах передачі, так і розподілу електроенергії, наприклад, послідовна компенсація в лініях змінного струму та лініях високовольтного постійного струму в системах передачі, розподілена генерація та накопичення енергії в системах розподілу тощо. Ці нові розробки призводять до значно складніших характеристик, ніж у звичайних системах. Відповідно, існуюча система захисту та керування більше не буде ефективною для роботи з новими системами, і це призвело до запропонованої системи IWAPC.

Як показано, система IWAPC складається з різного обладнання на різних рівнях: знизу вгору, є інтегроване багатофункціональне інтелектуальне обладнання на місцевому рівні; під станційна комунікаційна мережа та інтегрований під станційний захист і керування на під станційному рівні; широко зональна комунікаційна мережа, інтегрована широко зональна інформаційна платформа та інтегрований широко зональний (регіональний) захист і керування на широко зональному рівні. Ключовими частинами системи є високошвидкісна широко зональна комунікаційна мережа та платформа синхронізованої інформації в реальному часі.

IWAPC додатково розширено до диспетчеризації з метою досягнення інтеграції диспетчеризації, захисту та керування енергетичною мережею, і відповідно до три-рівневої архітектури диспетчеризації (країна, область, регіон) реалізувати функції регіонального захисту, керування та диспетчерського управління.

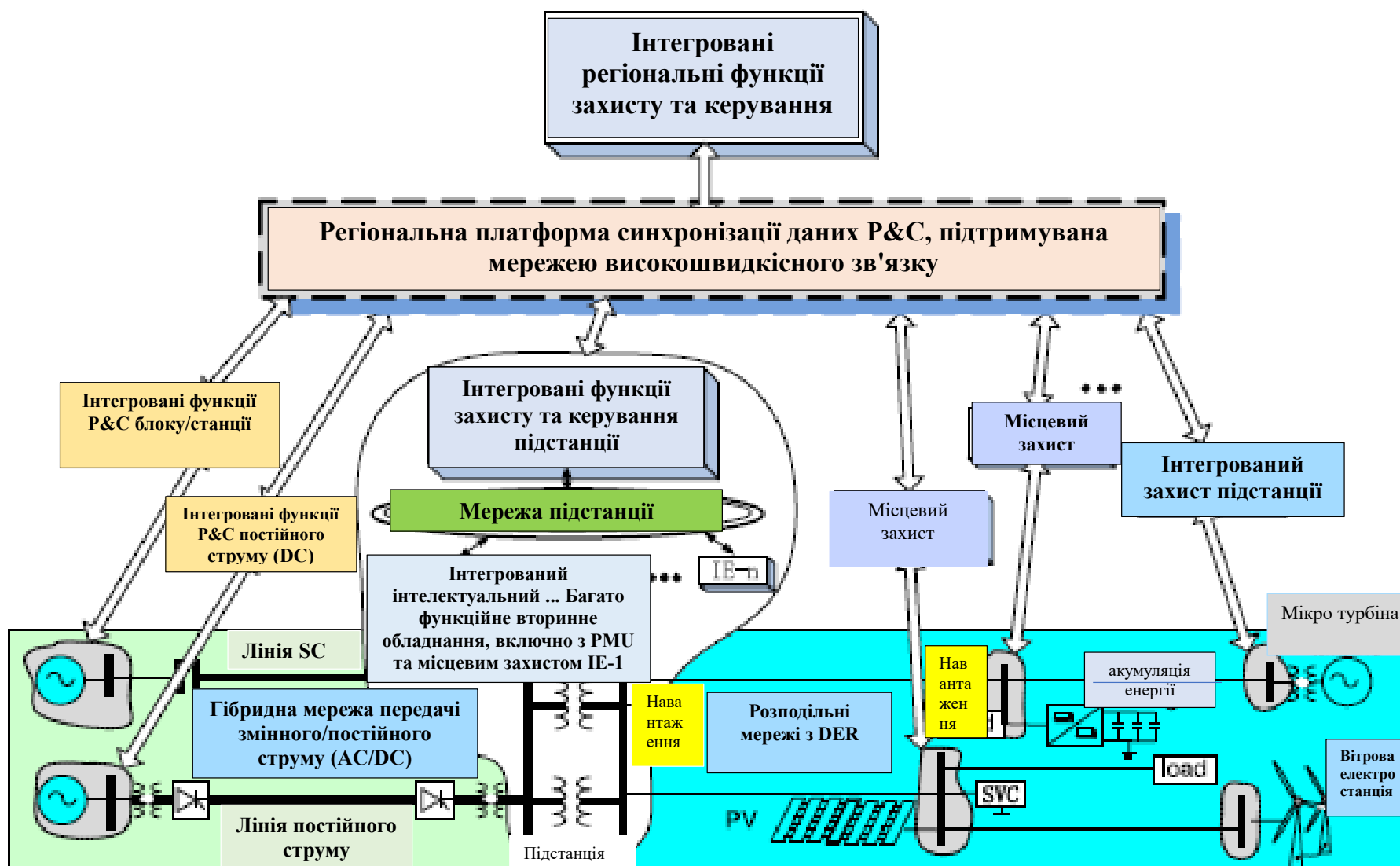


Рисунок 2.1 Інтегрований захист і керування в широкій зоні (IWAPC)

2.2 Багатофункціональне інтелектуальне обладнання на місцевому рівні

Як показано на рис. 2.1, інтелектуальне обладнання на місцевому рівні є інтегрованим вторинним обладнанням з багатьма функціями на підстанції, яке в основному складається з мережева/модульною установкою (MU), інтелектуального терміналу, метрологічного вимірювання, PMU (Phasor Measurement Unit (фа зорний прилад вимірювання) та місцевого захисту. Обладнання відповідає за вибірку всіх даних в реальному часі та надсилання інформації до інтегрованої підстанції РЗА та широко зонної РЗА. Воно також отримує та виконує команди управління від інтегрованої підстанції РЗА та IWARPC[26]. Обладнання може бути інтегроване в первинне енергетичне обладнання та забезпечувати місцевий захист для 90% відповідних ділянок ліній. Воно має резервовану конфігурацію для забезпечення надійності, разом з іншими інтегрованими функціями, такими як реєстратор аварійних подій, зберігання даних та аналіз мережі тощо.

2.3 Інтегрований захист і керування підстанцією на рівні підстанції/установки

Релейний захист і автоматика (РЗА) підстанції об'єднує функції захисту ліній, шин, трансформаторів, відмови вимикача; автоматичного повторного ввімкнення (АПВ), автоматичного перемикавання шин (АПШ), автоматичного частотного розвантаження (АЧР), автоматичного розвантаження за напругою (АРН), проти перевантажувального блокування та функції керування підстанцією тощо[27]. Він використовує інформацію з усієї підстанції для реалізації резервного захисту підстанції та автоматичного керування безпекою тощо. Вимикачі використовуються як елементи для конфігурації адаптивного резервного захисту, а диференціальний захист струму використовується для заміни ступінчастого захисту від надструмів, захисту відмови вимикача та захисту мертвої зони у звичайній системі захисту[28].

2.4 Інтегрований широко зонний/регіональний захист та управління.

IWAPC[29], спеціально розроблений для захисту та управління електричною мережею, здатний забезпечити швидкий захист. Крім того, він інтегрує функції автоматичного АЧР (автоматичного частотного розвантаження) та АЗН (автоматичного захисту від зниження напруги), регулювання напруги та частоти, виявлення коливань та розділення при виході з синхронізму тощо. Додатково, IWAPC також включає функцію захисту та управління безпекою поперечного перерізу передачі електроенергії. На відміну від традиційних захисту та управління, які розділені як у проектуванні, так і в експлуатації, IWAPC інтегрує захист та управління в одну оптимальну комбіновану систему, яка ефективно координує захист та управління широкою зоною (регіональною), з метою досягнення значних покращень у захисті та управлінні енергетичними системами.

2.5 Синхронізована високошвидкісна комунікаційна мережа

Одним з найважливіших елементів системи IWAPC[30] є швидкісна комунікаційна мережа. У цьому відношенні, найновіша розробка в комунікаційних мережах, Packet Transport Network (PTN) (Мережа пакетної передачі), може бути кращим вибором для реалізації такого завдання. Нинішня мережа зв'язку в енергетиці в основному використовується в мультисервісних транспортних платформах на основі Synchronous Digital Hierarchy (SDH) (Синхронної цифрової ієрархії). Її переваги полягають у високій ефективності для передачі послуг TDM, низькій затримці, високій надійності, з можливостями кінцевого управління. Однак, з новими тенденціями в розвитку інтелектуальних мереж, технологія SDH поступово виявила свої обмеження, такі як низька ефективність передачі та погана гнучкість для послуг передачі даних. На відміну від цього, PTN може реалізувати статистичне мультиплексування та ефективну передачу пакетних послуг за допомогою комутації пакетів, що може подолати недоліки жорсткої пропускної здатності SDH. Крім того, вона може забезпечити хорошу якість обслуговування,

експлуатацію, адміністрування та технічне обслуговування. Само відновлювана оптична мережа використовується для з'єднання ряду підстанцій в регіоні, щоб забезпечити повний обмін динамічною та перехідною інформацією для всіх електричних вимірювань, стану вимикачів та операцій захисту; використовуючи високо надійну технологію IEEE-1588 для забезпечення синхронізації часу обміну даними, щоб забезпечити дані для інтегрованого широко зонного захисту та управління. Однак, SDH все ще є варіантом для завдання, оскільки вона широко застосовується в енергетичній мережі.

2.6 Синхронізована інформаційна платформа

Підстанція обладнана широким спектром електричного обладнання зі складною конструкцією, яке важко обслуговувати[31]. Зі збільшенням автоматизації енергосистеми та рівня інтелекту, мережа системи розширюється, разом із величезною кількістю інформації в захисті та керуванні. Оскільки кожна одиниця інформації збирається та зберігається різними пристроями в кожній окремій системі, сумісність внутрішніх даних енергосистеми між системами є низькою, а складні протоколи зв'язку, як правило, створюють інформаційні острови. Відповідно, дані вимірювань і механізм керування захистом не можуть бути спільно використані, що обмежує інтеграцію інформації. Захист і керування інтелектуальною мережею вимагають вирішення нових завдань застосування, щоб і надалі покращувати можливості інформаційної платформи для майбутнього розвитку ключових технологій і зробити систему інформаційної платформи більш відкритою.

Платформа синхронізованої інформації[32] в реальному часі точно збирає інформацію з широкої зони та проводить інтелектуальний аналіз даних, щоб дослідити логічний зв'язок між інформацією в реальному часі для підвищення чутливості, надійності та стійкості до відмов. Дані, отримані з платформи, включають статичні, динамічні, перехідні вимірювання та стани вимикачів тощо. Цінна інформація витягується з даних і розподіляється між різними спеціально розробленими обчислювальними алгоритмами на платформі для

виконання розширених функцій захисту та керування енергомережою. На платформі необхідно передавати набори даних, і швидкість їх передачі залежить від застосування, наприклад, низька швидкість для аналізу непередбачених обставин, швидкість, близька до реального часу, для моніторингу, швидкість реального часу для керування та висока швидкість для захисту широкої зони, зокрема, синхронізація часу. Інформація також може включати інші типи даних, такі як температура масла та навколишнього середовища трансформатора, швидкість і напрямок вітру, інтенсивність сонячного випромінювання тощо. З іншого боку, інформація зберігається ієрархічно, а не централізовано, що охоплює ієрархічну систему захисту та керування. Оснащена новітньою високошвидкісною синхронізованою технологією зв'язку, інтегрована з передовими технологіями захисту та останніми розробками в системі керування, система пропонує не тільки швидкий захист, але й повний контроль над усією енергомережою.

Впроваджено передові обчислювальні технології для створення синхронізованої інформаційної платформи для захисту та керування широкою зоною, побудови мережі збору даних панорамної експлуатації та технічного обслуговування, забезпечення стандартизованого інтерфейсу для кінцевого пристрою, формування платформи спільного використання ресурсів, гнучкої та інтерактивної, відкритої та впорядкованої інформаційної платформи. Підсумовуючи, передові обчислювальні технології використовуються для створення розподіленої спільної інтелектуальної інформаційної платформи, спрощення обладнання для збору даних терміналу та руйнування бар'єрів між системами захисту та керування на різних підстанціях за допомогою спеціально розробленої синхронізованої інформаційної платформи[33].

Висновок до другого розділу

Інтегрована система широкої зони/регіонального захисту й керування (IWAPC) об'єднує багаторівневу архітектуру: локальне багатофункціональне інтелектуальне обладнання, інтегрований під станційний захист і керування, високошвидкісна широко-зональна комунікаційна мережа та синхронізована

інформаційна платформа. IWAPC враховує сучасні зміни в передачі й розподілі (розподілена генерація, накопичення енергії, HVDC, послідовна компенсація), які ускладнюють характеристики системи й роблять традиційні рішення неефективними.

Ключові елементи:

- Локальний рівень: модульні пристрої, PMU, метрологія, локальний захист — збір реальних даних, виконання команд і резервування для надійності.
- Під станційний рівень: інтегрований РЗА з функціями захисту, автоматикою (АПВ, АПШ, АЧР, АРН) і диференціальним захистом для підвищення резервування й адаптивності.
- Регіональний рівень: інтегрований широко зональний захист і керування, що поєднує захист і оперативне управління (регулювання напруги/частоти, виявлення коливань, розділення при десинхронізації).
- Комунікації: синхронізована високошвидкісна мережа (рекомендовано PTN; SDH — можливий варіант) та IEEE-1588 для точного часу.
- Інформаційна платформа: синхронізована в реальному часі платформа збору й аналізу даних (статичні, динамічні, перехідні, стани вимикачів), розподілена й ієрархічна, що забезпечує стандартизований інтерфейс, спільне використання даних та високі вимоги до затримки залежно від застосування.

Переваги IWAPC:

- Підвищена чутливість, надійність і стійкість до відмов;
- Швидкий та координований регіональний захист і керування;
- Інтеграція диспетчеризації, захисту й керування у три-рівневій архітектурі;
- Зниження інформаційних «островів» через єдину синхронізовану платформу.

IWAPC — це масштабована, синхронізована й резервована система, що інтегрує захист і керування на локальному, під станційному та регіональному рівнях, використовуючи високошвидкісні комунікації та синхронізовану інформаційну платформу для ефективної роботи сучасних складних енергосистем.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ПОТОКУ В ГІБРИДНІЙ МЕРЕЖІ РОЗПОДІЛУ ЗМІННОГО/ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МАРШРУТИЗАТОРА

3.1 Показники оцінювання роботи мережі змінного/постійного струму.

1) Середній ступінь відхилення напруги в гібридній мережі.

Це визначається як середнє значення відхилення напруги вузла під час стабільної роботи, яке виражається як:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n_{AC}} d_{AC,i} + \sum_{i=1}^{n_{DC}} d_{DC,i}}{n_{AC} + n_{DC}}, \quad (1)$$
$$d_{AC,i} = \frac{U_{ACN,i} - U_{ACR,i}}{U_{ACN,i}} \times 100\%,$$
$$d_{DC,i} = \frac{U_{DCN,i} - U_{DCR,i}}{U_{DCN,i}} \times 100\%$$

У формулі частина змінного струму (AC) включає: загальну кількість вузлів змінного струму n_{AC} , ступінь відхилення напруги $n_{AC,i}$, у вузлу змінного струму i , номінальну напругу $U_{ACN,i}$ та фактичну напругу $U_{ACR,i}$. Частина постійного струму (DC) включає: загальну кількість вузлів постійного струму n_{DC} , ступінь відхилення напруги $d_{DC,i}$ у вузлі постійного струму i , номінальну напругу $U_{DCN,i}$ та фактичну напругу $U_{DCR,i}$ [34].

2) Змішаний мережевий збиток

Визначається як сума збитків мережі змінного струму (AC) та постійного струму (DC).

$$\Delta P = \Delta P_{AC} + \Delta P_{DC},$$
$$\Delta P_{DC} = \sum_{i=1}^{n_{SC}} \sum_{j>i}^{n_{BC}} \Delta P_{DC,ij},$$
$$\Delta P_{DC,ij} = \frac{(U_{CD,i} - U_{DC,j})^2}{R_{DC,ij}},$$

$$\Delta P_{DC} = \sum_{i=1}^{n_{AC}} \sum_{j>i}^{n_{AC}} \Delta P_{AC,ij},$$

$$\Delta P_{AC,ij} = \frac{P_{AC,i}^2 + Q_{AC,i}^2}{U_{AC,i}^2} R_{AC,ij}$$

У формулі ΔP_{AC} та ΔP_{DC} відповідно є втратами в мережах змінного та постійного струму, $\Delta P_{DC,ij}$ — втрати в лінії змінного струму.

$P_{AC,i}$, $Q_{AC,i}$, та $U_{AC,i}$, — активна і реактивна потужності та амплітуда напруги у вузлу змінного струму. $U_{AC,ij}$ — опір гілки між вузлами змінного струму. $\Delta P_{DC,ij}$ — втрати в лінії постійного струму, $U_{DC,i}$ та $U_{DC,j}$ — значення напруги в вузлах постійного струму, $R_{DC,ij}$ — опір гілки між вузлами постійного струму.

3.2 Обмеження розрахунку потоків потужності

3.2.1. Системи змінного струму (AC) та системи постійного струму (DC). Для систем змінного струму необхідно враховувати обмеження напруги у вузлах, обмеження потужності генераторів та обмеження потужності між вузлами. У системах постійного струму слід враховувати обмеження напруги у вузлах та струму в лініях.

3.2.2. Джерела напруги з перетворювачами (Voltage Source Converters, VSC).

$$\begin{cases} U_{ci\min} < U_{ci} < U_{ci\max} \\ -I_{ci\max} < I_{ci} < I_{ci\max} \end{cases}$$

У формулі $U_{ci\min}$ та $U_{ci\max}$ є верхнім і нижнім обмеженням напруги на стороні змінного струму перетворювача. $U_{ci\max}$ — це верхній ліміт струму перетворювача[34].

3.2.3. Обмеження енергетичного маршрутизатора.

Для шини обміну енергією ЕМ повинні бути дотримані верхня та нижня межі сумарної потужності перемикавання.

$$\begin{cases} P_{\Phi, \min} \leq \sum_{i=N+1}^{N+K_{\Phi}} P_i \leq P_{\Phi, \max} \\ P_{\Psi, \min} \leq \sum_{i=N+K_0+1}^{N+K} P_i \leq P_{\Psi, \max} \end{cases}$$

У формулі, $P_{\Phi, \min}$ та $P_{\Phi, \max}$ є верхньою та нижньою межами потужності обміну первинної сторони, а $P_{\Psi, \min}$ та $P_{\Psi, \max}$ є верхньою та нижньою межами потужності обміну вторинної сторони[35].

Алгоритм розрахунку гібридної системи показано на Рис. 3.1

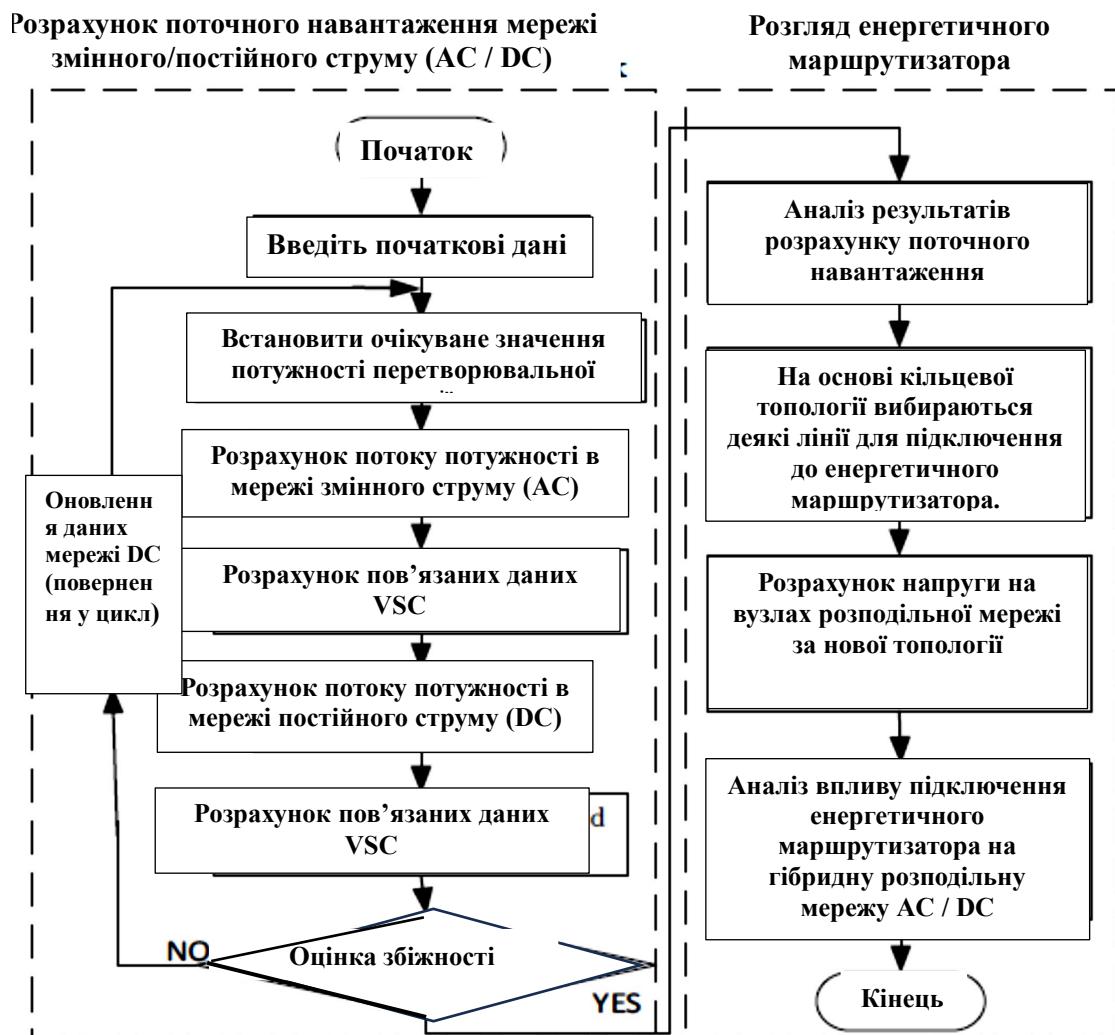


Рисунок 3.1 Процес розрахунку потужності потоку в гібридній мережі розподілу змінного/постійного струму

Структурований опис процесу розрахунку потужності потоку в гібридній мережі розподілу змінного/постійного струму (AC/DC), на основі блок-схеми з Рис. 3.1

1. Підготовка та вхідні дані.

Введення початкових даних: топологія мережі (AC та DC підмережі), параметри ліній і трансформаторів, місця підключення перетворювачів (VSC), генератори, навантаження, кількість і характеристики енергетичного маршрутизатора.

Завантаження очікуваних значень потужності перетворювальної техніки (вихідні/вхідні потужності VSC, режим роботи: інвертор/випрямляч).

2. Розрахунок потоків в AC-частині.

Встановлення очікуваних значень перетворювальної потужності як граничних/заданих джерел у вузлах AC.

Виконання розрахунку потоків потужності в мережі змінного струму (AC load flow): розв'язання рівнянь балансу потужності для кожного вузла (активна та реактивна), визначення струмів і втрат у лініях, напруги вузлів.

Збереження результатів (потужності, струмів, напруги, втрат) і передача пов'язаних даних VSC (реакція перетворювачів на мережні умови)[36].

3. Розрахунок пов'язаних даних VSC

Оцінка обмежень і поведінки VSC: допустимі значення струму, компенсація реактивної потужності, керування DC-напругою.

Коригування виділених потужностей між AC і DC частинами з урахуванням можливостей перетворювачів.

4. Розрахунок потоків в DC-частині

На основі скоригованих даних VSC виконують розрахунок потоків постійного струму (DC load flow): баланс потужності в DC-шинах, струми у DC-лініях, падіння напруги на лініях і втрати.

Оновлення параметрів і станів мережі DC.

5. Ітеративне оновлення та узгодження [37]

Передача назад до АС-розрахунку скоригованих значень з DC (і навпаки) — ітеративний цикл: оновлення даних мережі DC → повторний АС-розрахунок → оновлення VSC → DC-розрахунок тощо.

Після кожної ітерації виконуються перевірки збіжності (різниця потужності/напруги між ітераціями, похибки балансу потужності). Якщо критерій збіжності не виконано — повторити цикл.

6. Оцінка збіжності й корекція

Критерії: баланс активної потужності в кожній підмережі в межах допустимої похибки; стабільні значення напруги і струмів; дотримання обмежень VSC і ліній.

Якщо збіжність досягнута — фіксація остаточних результатів; якщо ні — перевірка моделі, кроків інтеграції, або застосування більш стабільних методів розв’язання (наприклад, покрокова релаксація, модифікований Ньютон-Рафсон, методи дихотомії для DC/АС узгодження) [38].

7. Додаткові етапи — аналіз енергетичного маршрутизатора (опціонально)[

Аналіз результатів поточних розрахунків для визначення позицій підключення енергетичного маршрутизатора у кільцевій топології.

Вибір ліній для включення маршрутизатора, перерахунок вузлових напруги і впливу на гібридну мережу.

Оцінка впливу маршрутизатора на баланс потужності, перерозподіл потоків і локальні перевантаження[39].

8. Підсумок вихідних результатів

Остаточні значення потоків активної й реактивної потужності в АС, потоків потужності в DC, напруги у вузлах, струмів у лініях, втрат та навантаження на VSC.

Звіти про узгодженість, рекомендації щодо перерозподілу навантажень або зміни режимів роботи перетворювачів/маршрутизатора.

Ключові особливості моделювання [40]

Необхідна інтерактивність через взаємозв’язок АС і DC через VSC.

Врахування обмежень перетворювачів (потужність, струм, контроль напруги).

Перевірка стабільності та локальних перевантажень при підключенні додаткових елементів (енергетичного маршрутизатора).

Можливе застосування адаптивних чисельних методів для прискорення збіжності.

Висновок до третього розділу

Запропонований ітеративний алгоритм розрахунку потоків у гібридній мережі AC/DC з урахуванням VSC та енергетичного маршрутизатора забезпечує узгоджене моделювання обох підмереж:

Оцінює середнє відхилення напруги та сумарні втрати;

Дотримує обмеження: напруги й потужності в AC, напруги й струми в DC, ліміти VSC та межі обміну маршрутизатора;

Працює ітеративне (AC $\rightarrow$ VSC $\rightarrow$ DC $\rightarrow$ узгодження) до збіжності; при необхідності застосовуються стабілізуючі чисельні методи.

Результат: адекватний інструмент для аналізу й оптимізації потоків, виявлення перевантажень і рекомендацій щодо регулювання VSC/маршрутизатора за умови коректних вхідних даних та забезпечення збіжності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Робота демонструє послідовну еволюцію систем захисту, автоматизації та керування електричних мереж від локальних апаратно-механічних рішень до сучасних інтегрованих цифрових, мережових і інформаційних архітектури. Історичний аналіз виокремлює три етапи розвитку — традиційні апаратні рішення, перехід з мікропроцесорними та цифровими методами і сучасну фазу мережової синхронізації й віддаленого моніторингу — що забезпечили значне підвищення швидкості, точності й діагностичних можливостей. Сучасні підходи характеризуються цифровізацією алгоритмів захисту, застосуванням адаптивних схем, синхронізованих вимірювань (PMU) та розвиненою комунікаційною інфраструктурою, що дозволяє реалізувати інтегрований широко-зональний (регіональний) захист і керування.

Запропонована архітектура IWAPC показує практичну реалізацію цих принципів: багаторівнева структура (локальний — під станційний — регіональний рівні), синхронізована високошвидкісна мережа, уніфікована інформаційна платформа та модульні пристрої забезпечують підвищену чутливість, надійність, швидку координацію дій і зниження інформаційних «островів». Водночас виклики залишаються — сумісність із застарілою апаратурою, точність і якість сенсорних даних, проблеми синхронізації часу, загрози кібербезпеки, електромагнітна сумісність та необхідність стандартизації інтерфейсів і процедур.

Ітеративний алгоритм розрахунку потоків у гібридних AC/DC мережах з врахуванням VSC і енергетичного маршрутизатора підтверджує працездатність інструменту для узгодженого моделювання підмереж, оцінки напруги, втрат і дотримання фізичних обмежень. Правильно реалізований, він дає змогу виявляти перевантаження, оптимізувати налаштування VSC/маршрутизатора і підтримувати стійкість режиму за умови коректних вхідних даних і забезпечення збіжності чисельних методів.

Загалом подальший розвиток систем вимагає комплексного підходу: технічної модернізації реле і засобів вимірювань, розбудови надійної та

синхронізованої комунікаційної інфраструктури, впровадження заходів кіберзахисту та уніфікації стандартів і процедур для координації дій на локальному, під станційному й регіональному рівнях. Такий підхід дозволить підвищити швидкість реагування, точність локалізації дефектів, адаптивність до змінних режимів та загальну надійність енергосистем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Посилення України шляхом децентралізації енергетичної системи
https://iea.blob.core.windows.net/assets/4701a071-bbec-48ee-a396-35cd96bc1eec/EmpoweringUkrainethroughaDecentralisedElectricitySystem_Ukrainian.pdf
2. Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики : Збірник праць / Інститут промислової екології. – К. : ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. – 290 с.
3. Z. Q. Bo, X. N. Lin, Q. P. Wang, Y. H. Yi1 and F. Q. Zhou1
Developments of power system protection and control Group Corporation, Group Corporation, Xuchang, China. 2Huazhong University of Scienceman Technology, Wuhan, China.
4. Побудова системи автоматичного вимірювання довжини прокату на основі аналізу якісних показників роботи головного приводу стану 650
https://ees.kdu.edu.ua/statti/2016_4_31.pdf
5. Диференційний захист
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%B8%D1%81%D1%82
6. <https://libarch.nmu.org.ua/items/00ffe318-7a7c-47d3-9c325157cddc0c28>
7. <https://libarch.nmu.org.ua/items/00ffe318-7a7c-47d3-9c325157cddc0c28>
8. Дистанційний захист (Distance/Impedance):
<https://kemt.kiev.ua/assets/library/files/k%D1%96diba-,shelepeten.pdf>
9. Мікропроцесорні релейні пристрої
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%96%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B9%D0

%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D1%85%D0%B8%D1%81%D1%82_%D1%82%D0%B0_%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0

10. Планування методом набігаючої хвилі (Rolling Wave Planning)

<https://pmb.com.ua/uk/slovar-terminov/planirovanie-metodom-nabegayushhej-volny-rolling-wave-planning-metod/>

11. Адаптивні алгоритми машинного навчання для інтелектуальних систем прийняття рішень

https://www.researchgate.net/publication/390522487_ADAPTIVNI_ALGORITMI_MASINNOGO_NAVCANNA_DLA_INTELEKTUALNIH_SISTEM_PRIJNATTA_RISEN Квітень 2025 року Наука і техніка сьогодні DOI: 10.52058/2786-6025-2025-3(44)-1485-1500

12. https://uk.wikipedia.org/wiki/Phasor_measurement_unit

13. <https://www.sgrwin.com/goose-mms-and-sv-protocols/>

14. <https://oblik.online/iec-61850-avtomatizatsiia-pidstantsii>

15. Big Data Analytics In Cloud

Computing<https://www.ijstjournal.com/article/Big+Data+Analytics+In+Cloud+Computing>

16. Anomaly Detection AI: Benefits, Techniques, and Challenges

<https://www.techmagic.co/blog/ai-anomaly-detection>

17. Система широкомасштабного моніторингу, захисту, автоматизації та управління (WAMPAC) https://www.researchgate.net/publication/392023428_WideArea_Monitoring_Protection_Automation_and_Control_WAMPAC_System

18. https://wilo.com/ua/uk/%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D0B4%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F/uk/virobi/yonos-maxo_id155/2120639?param15=1|uk|langneutral|en

19. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 141

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології денної форми навчання [Електронний ресурс] / [Упорядник Я. В. Корпань]; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2019. – 124 с.

20. Лавренюк М.В. Алгоритми машинного навчання. Глибокі нейромережі в задачах механіки суцільних середовищ: Навчальний посібник. – Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2024. – 100 с.

21. Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, О.Ф. Буткевич, М.Ф. Сопель, В.М. Авраменко, В.Л. Прихно, П.О. Черненко Інститут електродинаміки НАН України, Київ організація моніторингу режимів енергооб'єднання України та нові можливості розв'язання задач диспетчерського керування <http://scinn.org.ua/sites/default/files/pdf/2009/N6/Stognij.pdf>

22. <https://unitrack.com.ua/opportunities/nablyudenie-onlajn/>

23. Віктюк Л.А. Архітектура інформаційних мереж: Навч. Посібник/ За ред. М.В. Захарченка – Одеса: УДАЗ ім. О.С.Попова, 2000. – 60 стор.

24. В.А. Баженов, І.А. Шаповал. Стан та перспективи розвитку електроенергетики та електромеханіки [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітня програма «Електроенергетика та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського Електронні текстові дані – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 100с

25. Огляд широкозонного керування в електроенергетичних системах з використанням контролерів FACTS
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7036325>

26. Удосконалення системи моніторингу забезпечення якості вищої освіти України : зб. тез доповідей наук.-практ. конф., квітень 2013 р., Дніпропетровськ/ М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Держ. вищ. навч. закл. «Нац.гірн. ун-т». – Д. : ДВНЗ «НГУ», 2013. – 369 с.

27. Керування Захистом і в Системах Автоматизації Підстанції

<https://general-energy.com.ua/keruvannya-zahistom-i-v-sistemah-avtomatizatsiyi-pidstantsiyi>

28. О.М. Ковалко, О.В. Новосельцев, Т.О. Євтухова. вертикально-інтегровані структури управління ефективністю функціонування систем комунальної теплоенергетики національна академія наук України Інститут технічної теплофізики. Київ 2017

29. Integrated Wide Area Protection and Control Systems based on Advanced Communication Network Z. Q. BO, Shengming GE, Q. P. WANG, Lin WANG, Fengquan ZHOU, Xing LIU and Z. F. FAN XUJI Group, State Grid Corporation, Beijing, China B M ZHANG Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing, China

30. PTN (мережа передачі пакетів) обладнання для передачі пакетів
<https://patents.google.com/patent/CN203119932U/en>

31. https://www.scribd.com/document/489942027/SDH-Principles#google_vignette

32. О.М. Ковалко, О.В. Новосельцев, Т.О. Євтухова. ВЕРТИКАЛЬНО-ІНТЕГРОВАНІ СТРУКТУРИ УПРАВЛІННЯ ЕФЕКТИВНІСТЮ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут технічної теплофізики. Київ 2017

33. Sun Li, Chen Wu, Jiang Xiaojian, Pan Pengpeng, Zhang Ke 2020 Coordinated Control of Multiple Operation Conditions for Multi-port Energy Router in Energy Internet Framework [J] Automation of Electric Power System 44(03) 32-45

34. 31. Du Yi, Jiang Daozhuo, Yin Rui, et al. 2015 Topological structure and control strategy of DC distribution network[J] Electric Power Automation Equipment 35(1) 139-145

35. Електричні системи та мережі: навч. посібник / уклад. Е-502 О. А. Парфенюк. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2013 184 с.
<https://archer.chnu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/8785/%D0%95%D0%A1>

%D0%86%D0%9C%20%D0%94%D1%80%D1%83%D0%BA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

36. Гаєвський О.Ю. "Методи дослідження, формування та керування інтелектуальними енергетичними системами та комплексами " Національна академія наук України ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
https://www.ive.org.ua/wpcontent/uploads/2_%D0%93%D0%B0%D1%94%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82-%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9.pdf

37. навч. посібник / В. А. Лушкін, І. Г. Абраменко, І. В. Барбашов та ін.; за ред. І. Г. Авраменка; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х. : ХНАМГ, 2013. – 193 с
<https://eprints.kname.edu.ua/28603/1/2011%20%D0%BF%D0%B5%D1%87%207%D0%9D.pdf>

38. Tu Chumming, Meng Yang, Xiao Fan, et al. 2017 An AC-DC hybrid microgrid energy router and operational modal analysis[J] Transactions of China Electrotechnical Society 32(22) 176-188

39. Sheng Wanxing, Duan Qing, Liang Ying, et al. 2015 Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy internet [J] Proceedings of the CSEE 35(15) 3760-3769

40. Liu Lianguang, Zhang Xiaoqing, Jiang Zhihua, et al. 2015 Research on power flow calculation and voltage profile in DC distribution network [J] Science Technology and Engineering 15(32) 42-48