

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ
З РЕЗИСТИВНИМ ЗАЗЕМЛЕННЯМ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ
БЕЗПЕКИ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РІВНЯХ

СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-2
спеціальності : 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

_____ / Микола АЛІМЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

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

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

«До захисту допущено»

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

Нормоконтроль _____ / Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

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

« ____ » _____ 2024 р.

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

здобувачу вищої освіти Микола АЛІМЕНКО

1. Тема «Дослідження аварійних режимів роботи електричних мереж з резистивним заземленням для забезпечення енергетичної безпеки систем розподілу електроенергії на рівнях середньої напруги»

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

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

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

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

Вступ. Перелік умовних позначень. Стратегічне планування, як фактор забезпечення енергетичної безпеки. Удосконалення методології використання системного підходу в аналізі енергетичної безпеки. Дослідження аварійних режимів роботи електричних мереж з резистивним заземленням нейтралі. Висновки. Список посилань

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

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

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

Керівник

(підпис)

Ганна МОСІЄНКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Микола АЛІМЕНКО

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК**виконання кваліфікаційної дипломної роботи**

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

Студент (ка)

(підпис)

Микола АЛІМЕНКО

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота виконана на 69 стор., містить 2 таблиці, 22 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 53 літературних посилань.

Об'єкт дослідження – режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

Мета роботи – дослідження аварійних режимів роботи електричних мереж з резистивним заземленням для забезпечення енергетичної безпеки систем розподілу електроенергії на рівнях середньої напруги.

У роботі пропонується індикація проходження несправності, яка використовує величину змін вектора фазних струмів між моментами часу безпосередньо перед і після виникнення несправності. В рамках магістерської роботи представлена теорія методу, представлений алгоритм методу, описані змодельовані мережі та процес дослідження методу. Крім того, показана продуктивність методу для кількох випадків, і зроблені висновки.

Тестування за результатами моделювання показало хороші перспективи запропонованого методу в мережах, що працюють в умовах надкомпенсації. Метод ненадійний для недостатньо компенсованих мереж; потрібне подальше дослідження, зосереджене на цьому питанні.

Перевага цього методу порівняно з деякими іншими доступними реалізаціями FPI полягає в тому, що він працює з дуже мінімальним введенням інформації: лише фазні струми в місці FPI, вибірка з частотою 1 кГц. Це на відміну від методів, які також вимагають вимірювання напруги, вимірювання з кількох місць, вимірювання високочастотних перехідних процесів або змін опору заземлення нейтралі.

Ключові слова: МІСЦЕ НЕСПРАВНОСТІ, ІНДИКАЦІЯ, ПРОХОДЖЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ (FPI), РЕЗОНАНСНО ЗАЗЕМЛЕНИЙ, КОМПЕНСОВАНА НЕЙТРАЛЬ, КОТУШКА ПЕТЕРСЕНА, КОТУШКА ДУГОГАСІННЯ, ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ, СЕРЕДНЯ НАПРУГА.

ABSTRACT

The master's work is published on 69 pages, there are 2 tables, 22 figures that characterize the results of the research, there are 53 literary essays.

The object of investigation is the operating modes of electrical lines.

The subject of investigation is electrical lines.

Purpose of work – advanced emergency modes in robotic electrical measures with resistive grounding terms for ensuring energy safety of rospodilu electrical energy systems in rivny medium voltage.

The robot displays an indication of the occurrence of a malfunction, which is the magnitude of the change in the vector of phase flows between the instants an hour immediately before and after the occurrence of a malfunction. As part of the master's thesis, the theory of the method is presented, the algorithm of the method is presented, the modeling measures and the research process of the method are described. In addition, the method has been shown to be effective for a number of fallouts and for the formation of the stem.

Testing the results of the modeling showed good prospects for the proposed method in terms of what works in the minds of overcompensation. The method is unreliable for insufficiently compensated measures; More research is needed, focusing on your nutrition.

The advantage of this method compared with other available FPI implementations lies in the fact that it works with even minimal inputs of information: only phase flows in the FPI place, sampling at a frequency of 1 kHz. This includes methods that also involve voltage fading, multi-site dimming, high-frequency transient fading, or changing the neutral grounding support.

Key words: FAULT LOCATION, INDICATION, FAULT PATH (FPI), RESONANTLY GROUNDED, COMPENSATED NEUTRAL, PETERSEN COIL, ARC EXTINGUISHING COIL, EARTH FAULT, MEDIUM VOLTAGE.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 СТРАТЕГІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЯК ФАКТОР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ	10
1.1. Удосконалення методології використання системного підходу в аналізі енергетичної безпеки	10
1.2. Використання системного підходу для стратегічного планування та постановки цілей	22
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	30
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З РЕЗИСТИВНИМ ЗАЗЕМЛЕННЯМ НЕЙТРАЛІ	31
2.1. Компенсація ємнісних струмів на землю в мережах середньої напруги	31
2.2. Пошук несправностей в мережах з резистивним заземленням нейтралі	32
2.3. Індикація проходження несправностей	33
2.4. Особливості використання в мережах середньої напруги резонансного заземлення нейтралів трансформаторів	36
2.5. Запропонований алгоритм ідентифікації проходження несправності	40
2.6. Опис тестової мережі	41
2.6.1. Продуктивність для різних типів мереж: лінія, кабель, змішана	43
2.6.1.1. Мережі з однорідними фідерами	44
2.6.1.2. Мережі зі змішаними пристроями	46
2.6.2. Вплив стійкості до несправностей	48

2.6.3. Залежність від резистивного струму в нейтралі	50
2.6.4. Вплив природного дисбалансу в мережах	51
2.6.5. Вплив розташування та ступеня компенсації в мережі	53
2.6.5.1. Розподілена компенсація	53
2.6.5.2. Недостатня компенсація	56
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	59
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	62
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	63

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

FPI – індикатор проходження несправності

FL – центральний локатор несправності

ДПФ – дискретне перетворення Фур'є

ПС – підстанція

ВСТУП

Метод індикації проходження замикань на землю в мережах із резонансним заземленням, заснований лише на вимірюванні фазного струму. Це особливо актуально для систем розподілу електроенергії на рівнях середньої напруги. Метод заснований на відносних величинах векторних змін фазних струмів внаслідок замикання. Він перевірений для різних типів мереж і робочих конфігурацій шляхом імітації мережі в pscadі використання змодельованих струмів як вхідних даних для реалізації методу в matlab. У мережах із надмірною компенсацією метод показує надійне виявлення проходження несправності з хорошою вибірковістю та чутливістю як для однорідних, так і для змішаних (кабель і повітряна лінія) фідерів. Однак для менш поширених недостатньо компенсованих систем він має обмеження, які описані далі в цьому дослідженні. Цей метод має хороший потенціал щодо економічності, оскільки вимагає лише поточних вимірювань з одного місця з помірною частотою вибірки.

У зв'язку з цим метою цієї магістерської роботи є ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРИЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З РЕЗИСТИВНИМ ЗАЗЕМЛЕННЯМ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РІВНЯХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ.

Об'єкт дослідження – режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

РОЗДІЛ 1. СТРАТЕГІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЯК ФАКТОР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ

1.1. Удосконалення методології використання системного підходу в аналізі енергетичної безпеки

Ми маємо завдання системного опису енергетичної безпеки, враховуючи її соціальні (живі) аспекти життєдіяльності. Загалом, під системою розуміється сукупність взаємопов'язаних елементів, що взаємодіють один з одним та утворюють єдине ціле. Графічне пояснення системного підходу до опису об'єкта управління представлено на рис. 1.1.

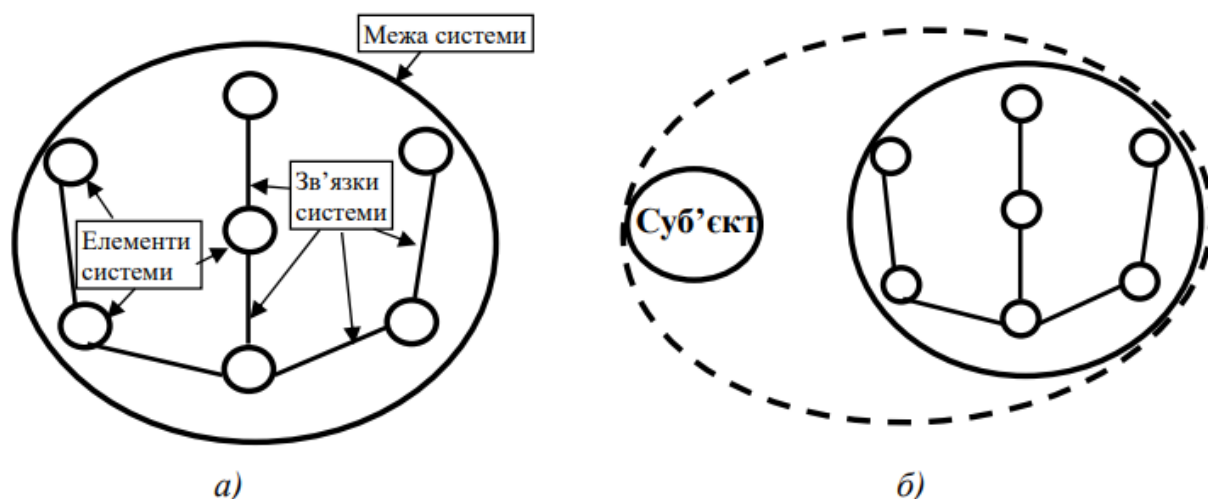


Рисунок 1.1. – Системний підхід до опису об'єкта управління: а) опис об'єкта як системи; б) опис суб'єкт-об'єктної системи

Системний підхід є потужним інструментом для аналізу та управління складними системами, такими як енергетична безпека. Розвиток методології застосування цього підходу дозволяє забезпечити більш комплексне та адекватне розуміння взаємозв'язків та динаміки в енергетичному секторі. Ось кілька основних аспектів розвитку цієї методології:

1. Інтеграція міждисциплінарних знань: Застосування системного підходу потребує інтеграції знань з різних галузей, включаючи економіку,

інженерію, екологію, політику тощо. Це дозволяє враховувати всі аспекти, що впливають на енергетичну безпеку.

2. Моделювання та симуляція: Використання чисельних методів моделювання та симуляції для аналізу та прогнозування поведінки енергетичних систем. Це включає розробку моделей, які враховують всі основні фактори, що впливають на систему.

3. Оцінка ризиків та вразливостей: Аналіз ризиків та вразливостей енергетичних систем дозволяє визначити потенційні загрози та розробити стратегії їх мінімізації. Системний підхід забезпечує комплексне бачення, що включає технічні, економічні та соціальні ризики.

4. Розробка сценаріїв: Створення різноманітних сценаріїв розвитку енергетичних систем у майбутньому. Це дозволяє оцінити можливі наслідки різних управлінських рішень та політик, а також підготуватися до несподіваних змін.

5. Оптимізація управління: Розробка та впровадження оптимізаційних алгоритмів для підвищення ефективності управління енергетичними системами. Це включає планування, моніторинг та контроль всіх елементів системи.

6. Врахування динаміки зовнішнього середовища: Постійне відстеження та аналіз змін у зовнішньому середовищі, включаючи політичні, економічні та екологічні фактори. Це дозволяє своєчасно реагувати на зміни та адаптувати стратегії управління.

Розвиток методології системного підходу до енергетичної безпеки створює основу для більш ефективного та безпечного управління енергетичними ресурсами. Це допомагає забезпечити стійкість та надійність енергетичних систем у довгостроковій перспективі.

Щоб усунути наявні обмеження технічного підходу до представлення об'єкта як системи, ми будемо розкривати систему, виокремлюючи не тільки традиційні складники (елементи, зв'язки, структуру), але й її процесуальний складник. На рис. 1.1 представлено послідовність станів системи, яка описує

трансформаційний процес, що відбувається в системі під впливом внутрішніх закономірностей життєдіяльності або зовнішніх чинників.

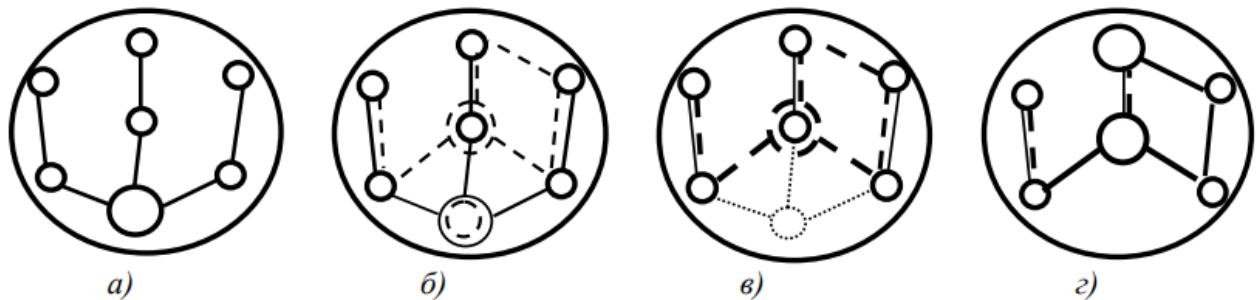


Рисунок 1.2. – Опис плин «трансформаційного» процесу в системі

Як бачимо, на рис. 1.2 представлено: а) системний опис об'єкта формалізованого (як має бути відповідно до законодавчих чи технічних рішень); б) опис об'єкта під час ідентифікації неформалізованих зв'язків і взаємовідносин між елементами на початку трансформаційного процесу; в) опис об'єкта з урахуванням неформалізованих зв'язків і взаємовідносин між елементами на етапі суттєвого посилення трансформаційного процесу; г) опис об'єкта з урахуванням зміни раніше формалізованих та неформалізованих зв'язків і взаємовідносин у рамках «нової» трансформованої системи.

Як видно на рис. 1.2, представлено: а) системний опис об'єкта, формалізованого відповідно до законодавчих або технічних рішень; б) опис об'єкта під час ідентифікації неформалізованих зв'язків та взаємовідносин між елементами на початковому етапі трансформаційного процесу; в) опис об'єкта з урахуванням неформалізованих зв'язків та взаємовідносин між елементами на етапі значного посилення трансформаційного процесу; г) опис об'єкта з урахуванням змін як формалізованих, так і неформалізованих зв'язків та взаємовідносин у межах «нової» трансформованої системи.

Залежно від «якості матеріалу» системи (міцності, стійкості елементів та структури зв'язків), цей трансформаційний процес може протікати з різною швидкістю і викликати різноманітні наслідки. З часом значимість деяких елементів і зв'язків може знижуватися (вони «відмирають»), тоді як важливість

інших може зростати (їхня вага збільшується). У результаті подальшої еволюції виникає «нова» система, яка взаємодіє з зовнішнім середовищем згідно з її «новими» властивостями.

Важливо зазначити, що, усвідомлюючи цей процес еволюції системи, суб'єкт управління може керувати його перебігом, впливаючи на матеріал системи (роблячи його «твердим», «м'яким» або «розумним»), а також на структуру зв'язків і елементів (вводячи нові, ліквідуючи деякі, або коригуючи наявні). Здійснюючи такий вплив, суб'єкт управління забезпечує розвиток системи, надаючи їй необхідні властивості для досягнення цільового, безпечного стану, а також формуючи стійкість до загроз.

Формалізацію системного підходу до опису об'єкта управління розглянемо на прикладі опису системи забезпечення енергетичної безпеки на національному рівні. Для цього виділяються «елементи» системи як окремі «менші» підсистеми, що виконують свою специфічну функціональну роль у функціонуванні всієї системи.

Виділені підсистеми повинні бути пов'язані з суб'єктами, відповідальними за їхнє функціонування (формування та реалізацію політики у відповідних підсистемах). Взаємодія суб'єктів, їх обмін ресурсами та інформацією формує структуру зв'язків системи. Такий підхід дозволяє управлінцю (досліднику) сконцентрувати увагу на взаємодії між елементами системи.

Прив'язка окремих елементів до суб'єктів, що відповідають за їхнє функціонування, спрощує визначення управлінських рішень (вплив на потужність елемента, структуру зв'язків між елементами, процеси обміну ресурсами та інформацією).

Таким чином, систему енергетичної безпеки можна представити графічно через її елементи, структуру зв'язків (організаційні та функціональні), як показано на рис. 1.3.

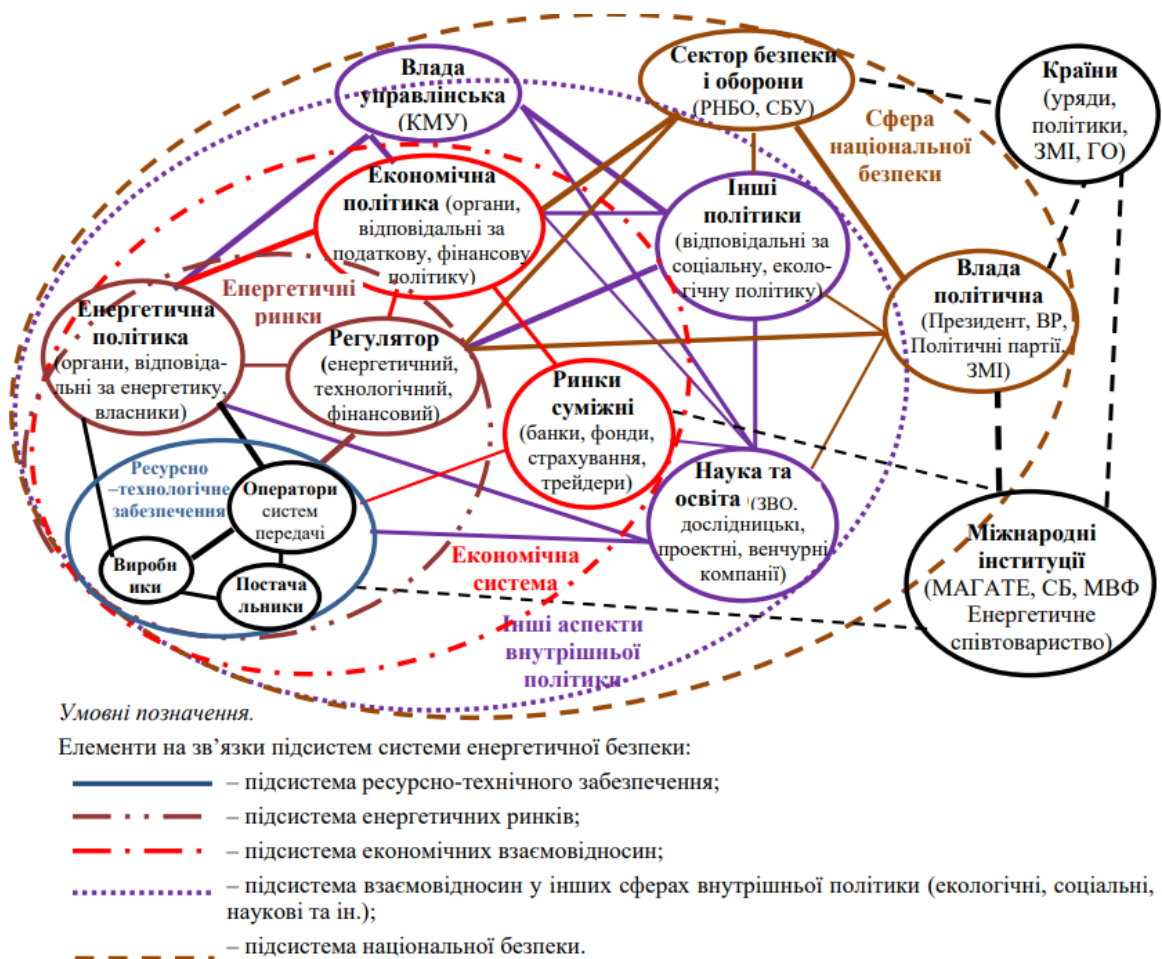


Рисунок 1.3. – Функціональні ролі (елементи/суб'єкти) та зв'язки системи енергетичної безпеки

Системний опис енергетичної безпеки, усвідомлення дослідником підсистем (окремих елементів), їх функціональних призначень і суб'єктів, відповідальних за їхню діяльність, відкривають можливості для створення відкритих управлінських систем (екосистемного підходу). Також це сприяє застосуванню наявної методології балансування інтересів різних суб'єктів (елементів системи) через формування «клієнтського ряду» для досягнення визначеної мети системи (реалізації її функцій, бізнес-процесів).

Застосування системного підходу дозволяє перейти до розробки стратегії сталого розвитку суб'єкт-об'єктної системи, здатної формувати узгоджені цілі (з урахуванням інтересів підсистем), проводити інституційні трансформації, адекватно визначати функціональні призначення елементів системи і чітко

визначати пріоритети управлінських рішень, виходячи з інтересів об'єкта управління.

Застосування цього підходу до опису змін у системі допомогло ідентифікувати і представити процес «рентної експлуатації» енергетичного сектору України. Це включає поступовий перехід права власності на активи енергетичного сектору України від держави до приватних власників, зростання впливу приватного сектору на функціонування енергетичної галузі країни та виведення частини управлінських повноважень і активів енергетики за межі національної юрисдикції [18; 32].

Відображенням цього процесу у системі стало поступове зношування основних виробничих фондів паливно-енергетичного комплексу, накопичення боргових зобов'язань та зниження кваліфікації персоналу підприємств і органів влади. Іншими словами, «зношеність основних виробничих фондів державних підприємств», «зростання частки приватних активів» та «зростання заборгованості за постачену енергію/ресурси» є показниками, що демонструють процес перерозподілу активів енергетики України.

В умовах такого процесу надання державної підтримки підприємствам (державні видатки на модернізацію, дотації для зниження собівартості продукції, погашення боргів тощо) є недоцільним управлінським рішенням, що фактично створює комплекс нових загроз для енергетичної та національної безпеки України.

Детальний опис системи енергетичної безпеки буде представлено через набір параметрів, що описують процеси у системі, які відбуваються як внаслідок її формалізованого функціонування, так і під впливом дестабілізуючих чинників (загроз) чи визначених цілей розвитку.

Отже, використовуючи системний підхід для опису об'єкта управління, такого як енергетична безпека, ми можемо визначити кілька важливих параметрів, щоб подолати обмеження технічного підходу (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. – Застосування системного підходу до опису об'єкта управління

Блоки	Системний зміст	Зміст параметрів	Опис орієнтовного набору параметрів енергетичної безпеки
Комплексна система	Система як частина ширшої системи: • функція цієї системи в ширшій системі; • пріоритет взаємодії (труднощі/переваги) цієї системи для ширшої. Ціннісні характеристики системи.	Залежність від імпорту (постачальник – споживач); диверсифікація (ринків, джерел, технологій); інтеграція (ресурсна, технологічна, транзитна, економічна (корпоративна, ринкова), політична, транзитна). Суб'єктність (щодо позиціонування, прийняття рішень, виконання); політико-економічна модель організації функціонування системи.	загальне енергоспоживання країною; виробництво енергоресурсів; частка енергетичного сектору у ВВП; вартість енергоресурсів у складі ВВП; баланс експорту-імпорту енергоресурсів; вартість імпорту енергоресурсів; споживання електроенергії на душу населення; енергоємність ВВП; викиди парникових газів на одиницю споживання та на людину; залежність імпорту/експорту від ресурсів (за видами енергетичних ресурсів); технологічна залежність імпорту/експорту (за типами енергетичних технологій); участь у міжнародних договорах; інтеграція в регіональні ринки (обсяги торгівлі), фізична наявність інтерконнекторів

			(мережі); методи та інструменти держави для регулювання цін на енергоресурси, енергію та послуги.
Компоненти та взаємозв'язки системи	Організаційна структура: - інституційне та організаційне врегулювання; - забезпеченість ресурсами елементів та зв'язків	Наявність: закріплення політико-економічної моделі (модель організації життєдіяльності системи); системної структури (інституційна інфраструктура (елементи, суб'єкти) та фізична)	Регуляторна модель енергетичних ринків; інституційне забезпечення (законодавство; органи державного управління та регулювання); інфраструктурна забезпеченість для критично важливих функцій/послуг (наявність, відповідність цілям); кадрове забезпечення (кваліфікація, відповідність вимогам системи); наявність внутрішніх суб'єктів, що надають допоміжні послуги у цій сфері; структура енергоспоживання; структура енергетичного балансу; наявність власних первинних енергоресурсів (відсоток від потреб; роки гарантованої наявності); структура державної та приватної власності (інвестицій) в енергетиці; частка внутрішніх/зовнішніх інвестицій в енергетиці; наявність неформалізованих

			зв'язків та інституцій у системі.
Завдання та обов'язки	Функціональна структура: • регламентованість ролей (завдання компонентів у системі); • наявність можливостей для виконання визначених функцій/послуг; • відповідність вимогам та цілям функціонування системи.	Юридичне регулювання структури надання цільових функцій (ролей/інституцій); формалізація вимог щодо характеристик ролей/інституцій, їх ефективності, надійності тощо; параметри цільових функцій/послуг (проектні параметри, відхилення).	Відповідність ролей/інституцій їх функціональним призначенням та цілям розвитку системи; відповідність інфраструктурного та інституційного забезпечення вимогам за визначеними життєво важливими функціями/послугами (електро-, газо-, тепло-, водопостачання тощо); структура генеруючих потужностей (базових, маневрових, пікових) для забезпечення енергетичних потреб; резервування/дублювання (інституцій, інфраструктури, ресурсів) на випадок кризових ситуацій – критерії (N-1/N-2), місяців споживання; частота і тривалість перерв в енергопостачанні на одного споживача; час відновлення основних послуг/функцій; залежність імпорту/експорту від одного джерела (за видами енергетичних ресурсів); залежність

			імпорту/експорту від одного джерела (за видами технологій); частка домінуючої країни (постачальника) у загальному обсязі імпорту; забезпечення сервісних функцій (управлінських, обслуговуючих, економічних, технологічних); наявність неформалізованих суб'єктів (ролей, інституцій), що впливають на функціонування системи; прозорість і відкритість процесу прийняття управлінських рішень.
Процедури	Процеси формальні (згідно зі структурою системи): • виробничі (розподіл ресурсів за структурою); • управлінські (відповідність рішень потребам процесу та цілям системи); • допоміжні (сервісні та підтримка на всіх етапах життєвого циклу).	Значення певного процесу для функціонування системи (ресурсне забезпечення, залучення, наповненість, завантаженість); ефективність і результативність процесу (затратність, досягнення цілей, відновлюваність) ; керованість (система	Забезпеченість потреб (різні види ресурсів та послуг); стійкість у наданні критично важливих функцій/послуг; енергетична ефективність цих послуг; кінцева вуглецеємність послуг; витрати на енергозабезпечення як частка доходів домогосподарств; прибутковість надання життєво важливих функцій/послуг; втрати при передачі,

	Процеси неформальні (трансформаційні, що викликають зміни в системі): • внутрішньо системні; • зовнішні системні.	моніторингу та коригування, резерви, нарощування, адаптація стимулів); належність до системи (екстериторіальність інвестицій, право власності, управління); синергетичність (узгодженість процесів на основі системних цінностей).	конверсії та споживанні енергоресурсів; ринкова концентрація (енергопостачання, технології, послуги) – індекс Герфіндаля-Гіршмана; рівень тінізації паливно-енергетичного комплексу (неформалізовані процеси, тіньове споживання ПЕР, тіньове завантаження капіталу, оплата праці); адекватність інвестицій у розвиток енергетики (оновлення основних засобів ПЕК); рівень зовнішніх інвестицій; ліквідність ринків; ринковий ризик; динаміка цін на ринках; здатність забезпечити зростання енергетичних потреб (резервні потужності, можливість збільшення видобутку/генерації); відновлюваність запасів/резервів; рівень зношеності основних фондів енергетики.
Складові системи.	Квалітетні параметри та специфікації для системи, її компонентів, структури та процесів.	Фізичний аспект (якісні параметри обладнання та ресурсів); управлінський аспект	Якість послуг (первинні ресурси, продукти та енергія); кваліфікація кадрів (технічних та управлінських);

		(кваліфікація персоналу); політичний аспект (відповідність суб'єкта).	відповідність політичних лідерів викликам, що стоять перед системою; якість політики (послідовність та ефективність постановки цілей та реалізації політики).
--	--	---	---

Запропонований системний підхід дозволяє узгодити наявні методи оцінки стану енергетичної безпеки, зокрема оцінювання безпеки як рівня захищеності та спроможності системи.

Таким чином, стан системи відображатиметься параметрами, що описують її цілісне сприйняття ззовні (більшою системою, іншими суб'єктами та об'єктами). Зовнішні суб'єкти не цікавляться внутрішніми процесами нашої системи (за винятком випадків спроб перехопити управління чи зруйнувати систему), і система оцінюється за параметрами, які характеризують її взаємозв'язки з зовнішнім середовищем. Фактично ця група параметрів відображає традиційний підхід до оцінки енергетичної безпеки як статичного об'єкта управління.

Здатність системи відображатиметься у наборах параметрів, які описують її функції та процеси. Ці параметри відображають взаємодію між елементами системи, динаміку реакції на різні чинники (внутрішні та зовнішні впливи) у межах формальної структури системи, а також відповідність функцій та процесів запланованим завданням. Ці складові частини системи мають бути об'єктом особливої уваги керівника, оскільки вони розкривають закономірності функціонування системи та визначають адекватність управлінських рішень.

Визначення конкретного набору параметрів для опису системи є творчим процесом, який залежить від цілей керівника (дослідника). У деяких випадках доцільно детально аналізувати окремі частини системи (елементи, зв'язки, функції, процеси). Наприклад, існує теоретична і практична потреба в аналізі ризиків критично важливих енергетичних систем, які забезпечують надання

цільових функцій/послуг. Однак, системний підхід може бути застосований для акцентування уваги на будь-якому аспекті чи частині системи.

Наприклад, при аналізі фізично-ресурсного компоненту функції чи процесу електропостачання, акцент буде зроблений на критичній енергетичній інфраструктурі, що вимагатиме від дослідника чи управлінця звертати увагу на фізичні аспекти функціонування системи електропостачання (ресурсна забезпеченість, фізична безпека, технічна надійність, стійкість).

Якщо фокус зміщений на управлінський компонент (процес формування та реалізації політики забезпечення енергетичної безпеки), подібний аналіз дає керівнику уявлення про здатність системи досягати цілей розвитку, реагувати на загрози і досягати "безпечного" стану (інституційна та організаційна забезпеченість, ефективність рішень, кваліфікація персоналу).

Вибір параметрів опису також буде визначатися світоглядними установками дослідника чи керівника щодо цінностей системи (політико-економічна модель організації функціонування системи), які визначають принципи існування системи, можливі та неможливі рішення, важливість та неважливість окремих аспектів.

Таке представлення системи дає можливість значно адекватніше описати складові частини енергетичної безпеки та формалізувати їх у державному управлінні.

1.2. Використання системного підходу для стратегічного планування та постановки цілей

Системний підхід є важливим інструментом для стратегічного планування та цілепокладання в енергетичному секторі. Його застосування дозволяє врахувати всі взаємозв'язки та взаємодії між різними компонентами енергетичної системи, а також визначити комплексне рішення для досягнення довгострокових цілей.

Основними елементами системного підходу є:

1. Інтеграція всіх складових: Системний підхід передбачає розгляд енергетичної системи як цілісного об'єкта, де всі елементи (генерація, передача, розподіл, споживання) є взаємопов'язаними і повинні працювати синхронно для досягнення ефективності. Усі стратегії мають бути спрямовані на інтеграцію різних технологій та ресурсів в єдину систему.

2. Аналіз впливу факторів зовнішнього середовища: У межах системного підходу важливо враховувати не лише внутрішні чинники, а й зовнішні — економічні, політичні, технологічні, екологічні та соціальні. Зміни в будь-якому з цих напрямків можуть мати значний вплив на енергетичну безпеку та стабільність системи.

3. Динамічність та адаптивність: Системний підхід передбачає, що стратегічні цілі повинні бути адаптованими до змінюваних умов. Врахування можливих кризових ситуацій, глобальних викликів та технологічних інновацій дозволяє коригувати стратегії і впроваджувати нові підходи у разі необхідності.

4. Оптимізація ресурсів: Використання системного підходу дозволяє оптимізувати використання наявних ресурсів, зокрема енергетичних, фінансових та людських, для досягнення поставлених цілей. Це включає вибір найбільш ефективних технологій, управління ресурсами на всіх етапах енергетичного циклу та зниження втрат.

5. Урахування ризиків та невизначеності: Важливо прогнозувати можливі ризики, пов'язані з зовнішніми загрозами (наприклад, геополітичними чи природними катастрофами), а також внутрішніми викликами, такими як старіння інфраструктури чи нестабільність ринку. За допомогою системного підходу можна розробити заходи для мінімізації цих ризиків.

Сам процес стратегічного цілепокладання за допомогою системного підходу заключається в наступному:

1. Аналіз ситуації: На першому етапі визначаються поточні умови, виклики та можливості, які існують в енергетичному секторі. Проводиться

комплексний аналіз всіх складових системи, визначаються основні тренди та прогнози на майбутнє.

2. Формулювання цілей: Виходячи з проведеного аналізу, розробляються стратегічні цілі, які враховують взаємодію між усіма елементами системи. Цілі мають бути реалістичними, вимірними і досяжними в межах доступних ресурсів.

3. Розробка стратегій: Для досягнення цілей визначаються відповідні стратегії. Кожна стратегія включає в себе набір дій, необхідних для реалізації поставлених завдань, з урахуванням поточних ресурсів та можливих ризиків.

4. Моніторинг і коригування: У рамках системного підходу важливо постійно відслідковувати результати реалізації стратегії, проводити аналіз ефективності, вносити корективи в разі відхилення від плану. Система має бути гнучкою та здатною адаптуватися до змін у внутрішньому та зовнішньому середовищі.

З зазначеного можливо виділити переваги застосування системного підходу:

- Цілісність і комплексність: Системний підхід дозволяє врахувати всі аспекти функціонування енергетичної системи і не обмежуватися лише окремими її частинами.
- Гнучкість і адаптивність: Завдяки врахуванню динамічних змін у зовнішньому середовищі, стратегічні цілі можуть коригуватися в залежності від нових реалій.
- Оптимізація ресурсів і зниження витрат: Системний підхід дозволяє ефективно використовувати наявні ресурси і забезпечує сталість енергетичних поставок навіть в умовах нестабільності.

Традиційне визначення безпечного стану через оцінювання параметрів поточного стану системи лише відображає проблеми, які виникають в конкретний момент часу, з огляду на її організаційно-інституційну структуру та інфраструктуру надання цільової функції або послуги. Водночас цей підхід не охоплює стратегічні аспекти розвитку системи, які передбачають

цілеспрямовані зміни її структури та оцінку загроз у довгостроковій перспективі. Як вже зазначалося, мета розвитку системи визначається зовнішніми вимогами. Інакше кажучи, встановлення «цілей» на основі прогнозування розвитку поточної системи (окремих характеристик організаційної структури та якості матеріалу елементів системи) не є належним підходом. Визначення бажаного стану системи має відбуватися через проєктування її функції та ролі у майбутньому функціонуванні більш комплексних систем.

Фактично, процес постановки цілей є політичним рішенням суб'єкта управління, яке базується на його світоглядних установах (цінностях) та баченні функціональної ролі об'єкта управління (візії) у більшій системі. Це формує вимогу до якості суб'єкта управління у відповідності його спроможностей і цінностей завданням розвитку системи, а також стратегічного бачення розвитку більш широких систем.

У цій науковій роботі ми розглядаємо енергетичну безпеку як окрему складову частину (підсистему) системи національної безпеки, включаючи інституційну структуру, функціональні призначення та організацію взаємодії між суб'єктами, що забезпечують національну безпеку.

Отже, використання системного підходу дозволяє зменшити рівень суб'єктивізму при постановці цілей. Цілі будуть визначатися вимогами більшої системи, частиною якої є ця менша система. Крім того, розглядається аспект оцінки "якості" суб'єкта, включаючи його зацікавленість у безпеці об'єкта, здатність розуміти вимоги більшої системи та приймати відповідні управлінські рішення.

Іншим важливим аспектом застосування системного підходу є планування досягнення «цільового безпечного» стану системи. Відразу слід зазначити, що формування цілей, які орієнтуються на збереження поточного стану системи незмінним (стан «як є»), не відповідає сучасним вимогам. Система повинна розвиватися, відображаючи у своєму розвитку зміни зовнішнього середовища. Водночас процес розвитку має бути стійким і

адаптованим до нових викликів. Суб'єкт управління визначає майбутній «цільовий» стан системи та розробляє план застосування конкретних управлінських рішень для досягнення цього стану.

Загалом, з точки зору постановки цілей можна застосовувати різні методологічні підходи. Найчастіше використовуються три основні методи:

1. Екстраполяція поточного стану в майбутнє: Цей підхід передбачає формування цілей та механізмів розвитку системи на основі перенесення поточних характеристик системи у майбутнє. Це включає соціально-економічний розвиток, використання наявних технологій, вартість капіталу, світоглядні установки тощо.

2. Вибір цільових еталонних показників: При цьому підході акцент робиться на досягненні конкурентного рівня з аналогічними системами. Це означає вибір параметрів, які відповідають цільовій групі країн-конкурентів України.

3. Проектування майбутнього: Цей метод включає формування цілей, виходячи з місця та ролі системи у більших системах. Враховується траєкторія розвитку соціально-економічних, технологічних та інших важливих аспектів. Це передбачає очікування змін у технологіях, знаннях тощо.

Незалежно від обраного підходу до постановки цілей, суб'єкт управління діє з метою забезпечення розвитку та безпеки системи. Розглянемо завдання, які постають перед суб'єктом управління під час виконання цього завдання (рис. 1.4, 1.5).

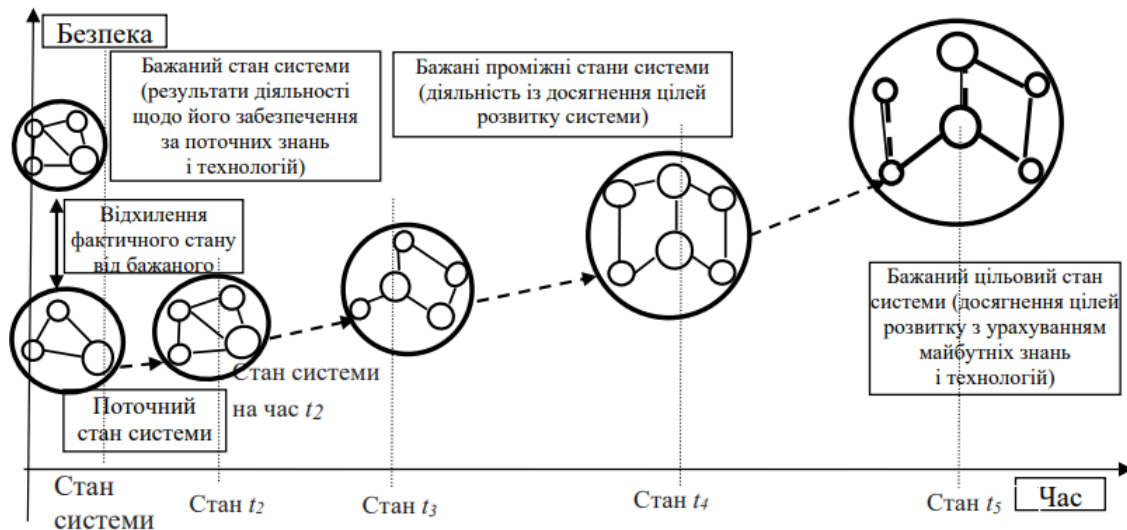


Рисунок 1.4. – Стратегування розвитку системи під час стратегічного планування досягнення цільового стану системи

У момент часу t_1 , суб'єкт управління порівнює поточний стан системи з цільовим безпечним станом. Аналізуючи відхилення параметрів поточного стану від індикативних безпечних значень, суб'єкт формує набір управлінських рішень. Для збереження системи у поточному стані («як є») формується обмежений набір управлінських рішень. Загрози поточному стану та відповідні управлінські рішення враховуються лише у випадку ризику припинення існування системи. У такому випадку діяльність не має горизонту планування і є реактивною відповіддю на недосконалі управлінські рішення, прийняті раніше.

Ми передбачаємо, що загрози енергетичній безпеці будуть своєчасно ідентифіковані суб'єктом, адекватно оцінені, і відповідні управлінські рішення будуть сплановані з урахуванням наявного часу на реагування (рис. 1.4). Суб'єкт управління планує свою діяльність "на майбутнє", щоб привести систему до безпечного стану в певний момент часу (наприклад, у час t_2 , з огляду на поточні характеристики системи, або в час t_5 , враховуючи характеристики майбутньої системи).

У випадку планування розвитку системи, зосереджуючись на збереженні окремих параметрів (поточні матеріали, знання, техніка, вартість капіталу

тощо), цілі розвитку системи визначаються як необхідність формування таких характеристик і властивостей системи (очікується досягнення цілей у момент часу t_2), які забезпечать її стійкість до поточних загроз.

У випадку стратегічного планування на тривалий період (очікується досягнення цілей у момент часу t_5), враховуючи складність і тривалість перетворень у системі для забезпечення її необхідними властивостями (відповідно до бачення системи), необхідно враховувати майбутні зміни знань і технологій.

Наприклад, перехід від централізованої та регульованої моделі ринку електроенергії до ліберальної та конкурентної моделі потребує створення нових елементів та взаємозв'язків у системі (формування операторів різних сегментів ринку, бірж, регулятора ринків; впровадження програмного забезпечення для автоматизації розрахунків, а також нової системи регулювання ринку). Це також включає зміну якості елементів системи та її матеріальної бази (питання освіти, перепідготовки персоналу, впровадження нових навчальних програм тощо).

Така вимога визначає перелік сфер, аспектів та проблем, які мають бути враховані при розробці стратегій для досягнення цих цілей. Водночас, горизонт планування (в часі) впливатиме на вибір параметрів та аспектів стратегічного планування, виходячи з концепції їх життєвого циклу (рис. 1.5).

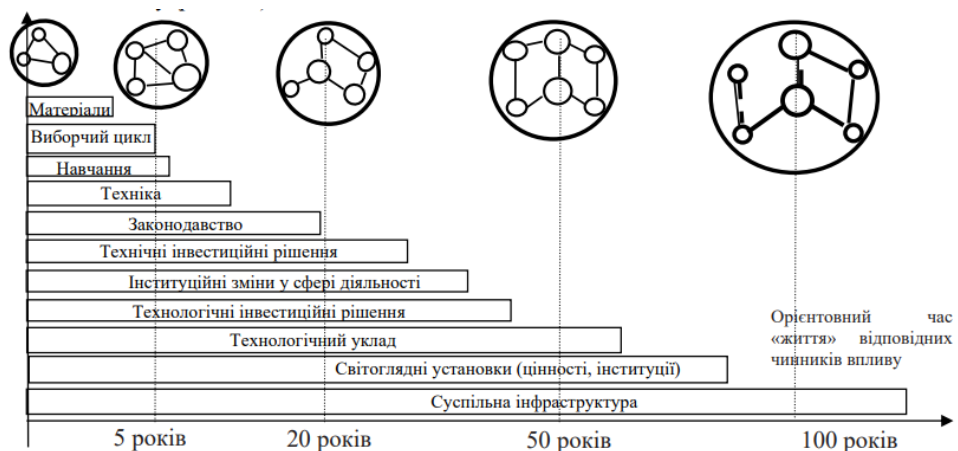


Рисунок 1.5. – Чинники впливу на розвиток системи, що мають бути враховані під час стратегічного планування досягнення цільового стану системи

Під час стратегічного планування розвитку системи, суб'єкт управління повинен не лише приймати управлінські рішення, спрямовані на зміну системи, але й враховувати динаміку та пропонувати рішення для впливу на ширші системи. Такі цикли описані в різних наукових дисциплінах, і суб'єкт управління повинен враховувати їх при проєктуванні майбутнього бажаного стану системи. Сюди відносяться цикли, такі як термін придатності матеріалів (дерево, бетон, метал тощо); період професійної підготовки; період каденції влади (політично-виборчий цикл); економічні цикли (цикли Кітчена, Жюглара, Кузнеця, Кондратьєва тощо); цикли технологічних змін; і цикли зміни світоглядних установок (зміна парадигм).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Застосування системного підходу до стратегічного цілепокладання в енергетичному секторі є необхідною умовою для досягнення енергоефективності, стабільності та безпеки. Урахування взаємозв'язків між усіма компонентами системи дозволяє розробити комплексні стратегії, які враховують всі чинники, що впливають на функціонування енергетичної інфраструктури та сприяють досягненню довгострокових цілей.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З РЕЗИСТИВНИМ ЗАЗЕМЛЕННЯМ НЕЙТРАЛІ

2.1. Компенсація ємнісних струмів на землю в мережах середньої напруги

Резонансне заземлення широко використовується в мережах середньої напруги в скандинавських країнах, а також у деяких інших європейських країнах, окрім розрізненого використання по всьому світу. Цей метод заземлення системи застосовується від найнижчих рівнів розподілу середньої напруги, таких як 10 кВ або менше, до дещо вище 100 кВ. Його історія налічує трохи більше століття, починаючи з початкових патентних заявок Петерсена в 1917 році [31] і його статті в 1919 році [32]. Його ключовою особливістю є те, що заземлення системи, як правило, нейтральної точки трифазного джерела, виконується за допомогою індуктивності, вибраної для компенсації паразитної ємності шунта мережі щодо землі. Індуктор, який використовується для цієї мети, є котушкою Петерсена, яку іноді називають компенсаційною котушкою або просто котушкою.

Якщо замикання на землю відбувається від фазного провідника в мережі без навмисного заземлення системи (ізольована мережа), струм, тим не менш, може протікати в замиканні, проходячи навколо петлі, яка включає ємності ліній і кабелів між іншими фазами та землею. Щоб «компенсувати» або «нейтралізувати» цей струм, можна додати котушку заземлення нейтралі, вибрану таким чином, щоб забезпечити струм, який значною мірою компенсує ємнісний струм. Тому струм, який залишається текти на землю через замикання, дуже низький, потенційно порядку кількох ампер. Таким чином, таке спеціальне заземлення може призвести до значно нижчого струму замикання на землю, ніж це сталося б без навмисного заземлення системи. Паралельно з котушкою можна додати опір, щоб створити невелику додаткову

резистивну складову в струмі замикання на землю. Це допомагає системам захисту визначити, який із кількох вихідних фідерів, що живляться від одного резонансно заземленого джерела, містить замикання на землю.

Особливими перевагами дуже низького струму замикання на землю є самозгасання короточасних дугових замикань на землю та низьке підвищення потенціалу землі навколо точки замикання. Перехідні замикання на землю легко виникають у системах повітряних ліній через зовнішні перешкоди, такі як дуга через розрив після перенапруги, спричиненої блискавкою. Вони часто самозгасають у резонансно заземленій мережі, оскільки слабкий струм не підтримує сильну дугу. У цьому випадку споживачі мережі не заважають, на відміну від інших методів заземлення, які вимагають автоматичного вимикача, повторного вмикання або запобіжника, щоб зупинити дугу. Замикання на землю середньої напруги можуть створювати небезпечну напругу на металевих частинах обладнання, у мережах низької напруги або на ґрунті, що оточує електрод. У областях, де земля має високий питомий опір, важко досягти достатньо низького опору заземлення, щоб обмежити підвищення потенціалу землі до прийняттого рівня, коли струми замикання на землю складають сотні ампер. Компенсація струму пошкодження до значно нижчих значень забезпечує спосіб підвищення безпеки в таких ситуаціях.

2.2. Пошук несправностей в мережах з резистивним заземленням нейтралі

Перераховані вище характеристики сприяли популярності резонансного заземлення. Однак через невелику величину струму замикання на землю стає дуже складно визначити місце замикання на землю в цьому типі мережі. Коли виникає постійне (неперехідне) замикання на землю, необхідно знайти та усунути несправність. Резонансно заземлена мережа потенційно може працювати з постійним замиканням на землю протягом годин [33], щоб утримувати споживачів на зв'язку, дозволяючи відстежити несправність. Однак

безперервна робота з постійною несправністю не завжди є популярним варіантом, оскільки це створює навантаження на ізоляцію непошкоджених фаз у всіх компонентах мережі та може спричинити небезпеку в точці замикання, незважаючи на малий струм замикання. Такий підхід практикується в деяких регіонах, але заборонений в інших. Там, де він не використовується, є додатковий стимул для швидкого виявлення тимчасових несправностей, протягом короткого часу до відключення несправного фідера, щоб можна було швидко усунути несправність і повторно підключити постраждалих клієнтів.

Традиційні функції визначення місця пошкодження в реле захисту засновані на вимірюванні опору мережі між реле та місцем пошкодження, коли протікає високий струм пошкодження. Вони погано працюють з малими струмами. Такі функції реле іноді відключаються, коли використовується резонансне заземлення, щоб уникнути плутанини [34]. Деякі з досліджень традиційних методів оцінки відстані несправності на основі імпедансу можна знайти в [35 , 36 , 37]. Удосконалення методів оцінки відстані несправності на основі адмітансу з часом описано в [38]. Незважаючи на розвиток у цій галузі, помилки в оцінці відстані значно зростають для замикань на землю зі значним опором.

2.3. Індикація проходження несправностей

Рішення на основі індикатора проходження несправності (FPI) стають все більш перспективними завдяки зниженню вартості та збільшенню можливостей вимірювань, обчислень і зв'язку. Ці розробки роблять можливим мати, наприклад, кілька точок в одному розподільному фідері, в якому вимірювання обробляються, а результати надсилаються назад до центру керування. Кожен FPI визначає, чи сталася несправність нижче за ним, тобто з іншого боку від підстанції джерела, де розташована котушка. Тоді несправність може бути визначена як така, що знаходиться в певній секції, відмежованій з одного боку джерелом або останнім FPI, який виявив вихідний збій, а з іншого боку кінцем

лінії або першим FPI, який не виявив вихідний збій несправності. Точність локації, яку забезпечують FPI, залежить від відстані між розмежувальною парою точок, тобто від довжини ділянок мережі між FPI.

Через низьку продуктивність справжньої локалізації несправності (оцінка відстані) у резонансно заземлених системах, невелика кількість FPI, розташованих у стратегічних місцях, може забезпечити краще покращення показників надійності, ніж наявність центрального локатора несправності (FL) [39]. Однак надійна ідентифікація місця розлому сама по собі є складним завданням. Однією з причин є невеликі величини струмів пошкодження навіть у порівнянні зі звичайними струмами навантаження. Інша причина полягає в тому, що під час замикання на землю існують струми нульової послідовності, пов'язані з замиканням, по всій системі, оскільки навіть непошкоджені фідери та відгалуження мають зміну струму нульової послідовності на свою ємність при наявності замикання на землю. зміщує нейтральний потенціал від потенціалу землі. Це означає, що сама по собі величина струму нульової послідовності не є адекватним кандидатом для ідентифікації проходження несправності.

Для надійної ідентифікації проходження несправності потрібна додаткова інформація, якщо використовуються величини вектора основної частоти. Нижче наведено кілька прикладів підходів, які були опубліковані.

Використання вимірювань напруги та струму пропонується в [40] для успішної ідентифікації як тимчасових, так і постійних несправностей. У [41] використовуються лише поточні вимірювання, але додаткова інформація отримана шляхом навмисної зміни параметрів нульової послідовності системи під час несправності з порівнянням вимірювань до та після цієї зміни. Зміна може бути зміною опору паралельно котушці. Інший підхід полягає у використанні струмів зворотної послідовності для ідентифікації проходу пошкодження, який пропонується в [41, 42]. У цих методах використовуються зміни струмів нульової та зворотної послідовностей. Однак чутливість цих методів не є задовільною в діапазоні опору замикання в кілька кОм. У Швеції

від багатьох типів мереж середньої напруги законодавчо вимагається відключати замикання на землю до 5 кОм негайно [43]. Таким чином, пошук несправностей до цього опору є важливим для скорочення часу простою споживача.

У [44] виявлення несправної секції було виконано за допомогою оцінки падіння напруги, вимірюваного на сторонах вторинної обмотки трансформаторів середньої та низької напруги. Цей метод вимагав зміни параметрів нульової послідовності під час несправності, що було реалізовано шляхом перемикавання резистора паралельно котушці Петерсена, щоб отримати значний додатковий струм майже 100 А, викликаючи явне падіння напруги. У [45] представлено рішення на основі струму, яке використовує різницю фаз між несправною фазою та справними фазами для ідентифікації проходження несправності. Він краще працює в мережах з недостатньою компенсацією і був протестований лише для систем з повітряними лініями. У [46] синхронізовані вимірювання струмів нульової послідовності централізовано збираються з різних точок мережі та порівнюються їх амплітуди; Очікується, що метод не буде придатним для фідерів як з повітряними лініями, так і з підземними кабелями.

Існує декілька досліджень, які використовують інформацію про перехідні процеси, ін'єкцію сигналу або виявлення біжучої хвилі для ідентифікації проходження розлому [47 , 48 , 49]. Усі ці підходи мають цікавий потенціал і є прикладами того, як сучасні пристрої здатні отримувати інформацію, яка була менш доступною для традиційних ретрансляторів. Однак ця робота зосереджена на рішеннях, заснованих на інформації про стаціонарний стан, тобто значеннях вектора, розрахованих на основі цілих періодів змінного струму.

Окрім надійного виявлення, економічна ефективність є однією з головних проблем, коли мова йде про впровадження рішень на основі FPI для ідентифікації несправних секцій, враховуючи, що в кожному фідері зазвичай потрібно кілька пристроїв FPI. Вимоги щодо вимірювання напруги та передачі високочастотних вимірювань можуть збільшити вартість. Отже, існує інтерес

до методів, заснованих лише на струмі на основній частоті для ідентифікації проходження несправності в резонансно заземлених мережах.

2.4. Особливості використання в мережах середньої напруги резонансного заземлення нейтралів трансформаторів

У симетричній трифазній мережі з резонансним заземленням потенціал нейтралі трансформатора при симетричних умовах дорівнює потенціалу землі. Під час замикання на землю цей потенціал змінюється в залежності від опору замикання. Для металевого замикання на землю напруга пошкодженої фази стає майже нульовою. Усі потенціали в мережі зсуваються приблизно на таку саму зміну вектора, оскільки струми, викликані замиканням на землю, недостатньо високі, щоб спричинити значні падіння напруги в опорах мережі. Таким чином, зміна потенціалу несправної фази виникає між нейтраллю та землею в протилежному напрямку, запускаючи струм через котушку.

На рисунку 3.1 показано розподіл струму під час замикання на землю в резонансно заземленій системі, коли котушка Петерсена налаштована на резонансну точку.

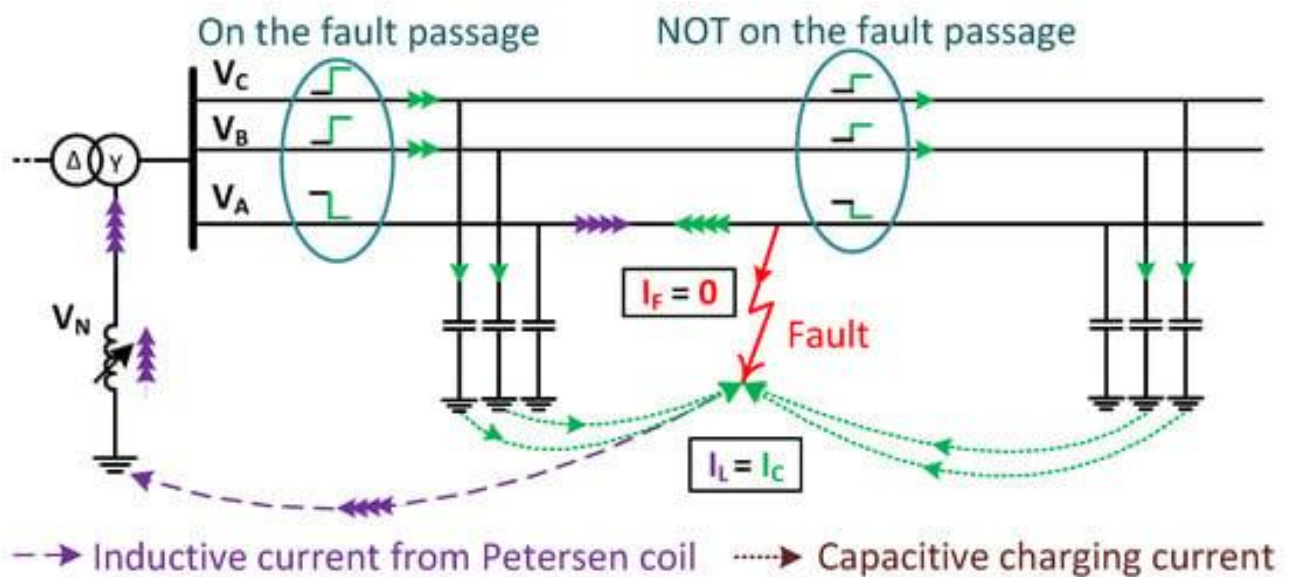


Рисунок 2.1. – Проста резонансна заземлена мережа, де котушка Петерсена налаштована на резонансну точку

Індуктивність котушки в резонансній точці можна виразити через кутову частоту системи ω і міжфазна ємність C

$$L = 13\omega^2 C L = 13\omega^2 C \quad (2.1)$$

У цій простій моделі з симетричною мережею, без послідовного опору в лініях, чисто ємнісним шунтом і без опору в котушці, струм пошкодження i_ϕ через місце несправності дорівнює нулю, коли виконується (2.1).

У збалансованому режимі фазові кількості розділені 120° . Якщо E - величина фазної напруги, $i_\alpha = 1 \angle 120^\circ$, $\alpha = 1 \angle 120^\circ$, тоді з потенціалом фази А як опорним кутом фазні потенціали та струми можна виразити таким чином, де доданий нижній індекс «1» позначає початковий випадок відсутності несправності:

$$\begin{aligned} v_{A1} &= E, & i_{A1} &= j \omega C E \\ v_{B1} &= \alpha^2 E, & i_{B1} &= \alpha^2 j \omega C E \\ v_{C1} &= \alpha E, & i_{C1} &= \alpha j \omega C E \end{aligned} \quad (2.2)$$

Розглянемо суцільне замикання на землю на фазі А. Задіяні струми є лише рівнем струмів навантаження або нижчими, тому джерело продовжує підтримувати звичайну напругу між фазними провідниками та нейтралю джерела. Через несправність потенціал пошкодженого фазного провідника відносно землі змінюється з вектора E на 0. Таким чином, усі інші потенціали в системі зміщуються цією самою зміною вектора, щоб стати

$$\begin{aligned} v_{N2} &= -E \\ v_{a2} &= 0 \\ v_{B2} &= \alpha^2 E + v_{N2} = (\alpha^2 - 1) E \\ v_{C2} &= \alpha E + v_{N2} = (\alpha - 1) E \end{aligned} \quad (2.3)$$

Таким чином, ємність пошкодженої фази щодо землі повністю розряджається, тоді як ємності здорових фаз щодо землі заряджаються далі через зростання потенціалу здорових фаз. Тоді відбуваються зміни фазних струмів через замикання на землю

$$\begin{aligned}
\Delta i_A &= i_{A2} - i_{A1} = j \omega C (v_{A2} - v_{A1}) = j \omega C E (0 - 1) = -j \omega C E \\
\Delta i_B &= i_{B2} - i_{B1} = j \omega C (v_{B2} - v_{B1}) = j \omega C E (\alpha^2 - 1 - \alpha^2) = -j \omega C E \quad (2.4) \\
\Delta i_C &= i_{C2} - i_{C1} = j \omega C (v_{C2} - v_{C1}) = j \omega C E (\alpha - 1 - \alpha) = -j \omega C E.
\end{aligned}$$

Це показує, що зміни вектора фазних струмів через металеве замикання на землю рівні:

$$\begin{aligned}
\Delta i_A &= \Delta i_B = \Delta i_C \\
&\text{і тому також} \\
|\Delta i_A| &= |\Delta i_B| = |\Delta i_C|. \quad (2.5)
\end{aligned}$$

Рівняння (2.5) також дійсне для резистивних замикань на землю в простій моделі, зображеній на рисунку 2.1, доки котушка Петерсена налаштована на резонансну точку. У цьому стані величини змін фазних струмів мають однакову природу незалежно від того, чи знаходиться точка вимірювання на місці пошкодження чи ні.

Реальні розподільчі мережі зазвичай не транспонуються, тому під час нормальної роботи існують асиметрії, особливо з повітряними лініями з відкритим дротом. Потенціал нейтралі трансформатора, v_N , у безвідмовній роботі тоді не дорівнює потенціалу землі. Якщо котушка налаштована на резонансну точку, v_N буде дуже чутливим до будь-якого дисбалансу, досягаючи високих рівнів у нормальній роботі. Це одна з причин, чому резонансно заземлені мережі рідко працюють у резонансній точці [40]. Звичайна практика полягає в тому, щоб запускати мережу в умовах дещо надлишкової компенсації [41], тобто котушка виробляє дещо більше струму, ніж потрібно для компенсації ємнісного струму. Цей додатковий струм може проходити через замикання на землю. На рисунку 2.2 показано ситуацію замикання на землю в мережі з надмірною компенсацією.

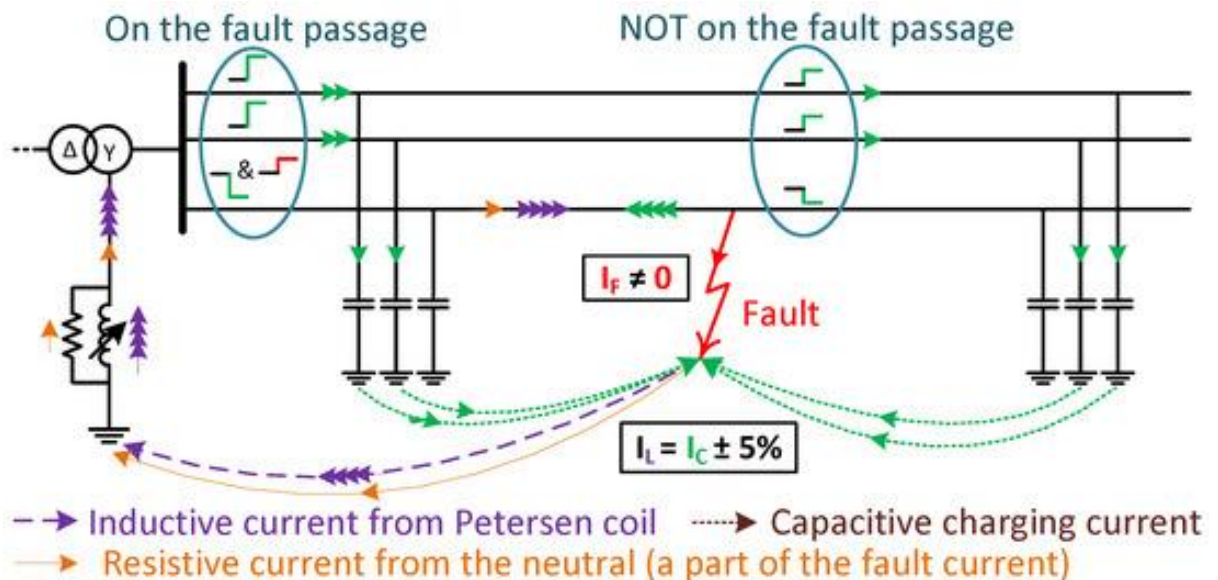


Рисунок 2.2. – Проста резонансна заземлена мережа, де котушка налаштована на надкомпенсацію

У деяких випадках існує опір, підключений паралельно котушці Петерсена, щоб допомогти системам захисту знайти несправний фідер [42] і зменшити підвищення напруги нейтралі через природні асиметрії. Максимальний струм замикання через місце замикання можна контролювати за допомогою вибору опору та ступеня надмірної компенсації.

Струм пошкодження протікає через пошкоджену фазу і повертається через місце пошкодження. Таким чином, у точках проходження несправності від джерела до несправності зміна величини струму несправної фази не дорівнює змінам величини струму здорових фаз. Будь-де в мережі, крім місця розлому, рівняння (2.5) залишається дійсним.

У реальній системі лінії пропускать струм навантаження, а також струми через ємність системи та несправність. Постійне навантаження є незначним для наведеного вище аналізу, оскільки зміни вектора фазних струмів (Δi) розглядаються на основі ідеальних вимірювань. Однак значні зміни в навантаженні під час несправності можуть створити ризик вплинути на результат виявлення через введення іншої причини Δi . Це розглядається далі в Обговоренні.

2.5. Запропонований алгоритм ідентифікації проходження несправності

На рисунку 2.3 показана блок-схема запропонованого алгоритму ідентифікації проходження несправності. Алгоритм безперервно проводить вибірку фазних струмів, обчислює струми нульової послідовності та зберігає дані вектора одного циклу останнього циклу. Якщо зміна струму нульової послідовності перевищує попередньо встановлене порогове значення, алгоритм виводить умову несправності та зберігає збережені вектори без їх оновлення.

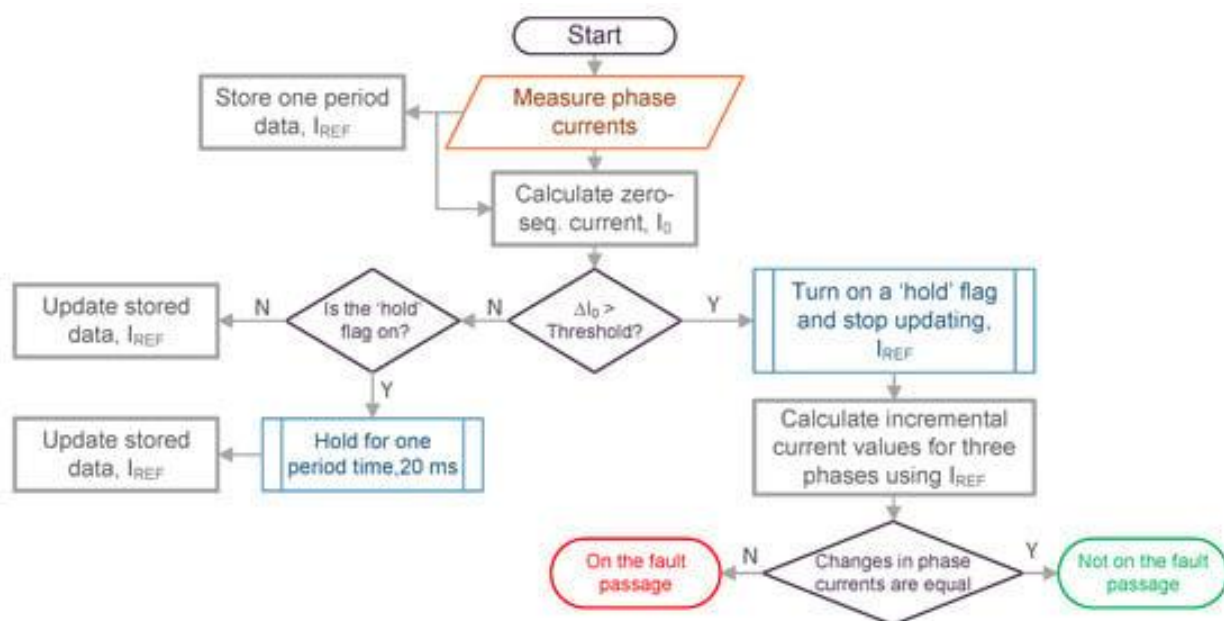


Рисунок 2.3. – Спрощена блок-схема запропонованого способу

Пізніші цикли фазних струмів потім порівнюються із збереженим циклом, щоб знайти зміни у фазних струмах. Якщо величини цих векторних змін у фазних струмах однакові для всіх трьох фаз, місце цього вимірювання повідомляється як місце, що не знаходиться на проході пошкодження; інакше місце розташування повідомляється як місце розлому. На практиці очікується, що зміни в здорових фазах не будуть точно однаковими через такі фактори, як помилки вимірювання або природні дисбаланси в мережі. Проте розрізнення між змінами в несправній фазі та здорових фазах, як видно з моделювання, існує, незважаючи на прийнятні рівні цих заважаючих факторів.

Збережений цикл не слід утримувати для порівняння з циклами, які надходять набагато пізніше, наприклад, кілька секунд між порівнюваними циклами. Однією з причин є те, що правильне порівняння фазового кута між широко розділеними циклами без додаткового сигналу синхронізації, такого як системна напруга, є чутливим до перешкод через відхилення частоти, як розглядається далі в Обговоренні. Після прийнятного часу для прийняття рішення про FPI, наприклад, через 0,1 с після виникнення несправності, збережений цикл може знову почати оновлюватися в практичній реалізації. Однак у нанесених на графік результатах моделювання використовується довший час, щоб показати довгостроковий розвиток виміряних величин; немає проблеми з частотою, оскільки симуляція має відому частоту та відповідну частоту дискретизації.

Фазори виводяться за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) на вікнах вибірок за один цикл, щоб знайти величину та фазу компонента основної частоти. Для обраної частоти дискретизації 1 кГц є 20 вибірок у вікні одного циклу для номінальної частоти мережі 50 Гц. Фазорні кути визначаються відносно першої точки у вікні одного циклу. Для того, щоб вектори до і після розлому використовували один і той самий кутовий орієнтир, час між двома вікнами вибирається як ціле число періодів, тобто кратне 20. Це припускає, що мережа знаходиться на номінальному рівні частота. Припущення справедливе для змодельованих даних, але в реальній системі може бути відхилення, про що йдеться далі в Обговоренні.

2.6. Опис тестової мережі

Запропонований метод був перевірений шляхом його реалізації в Matlab і запуску цього з вхідними даними моделювання в часовій області в PSCAD різних резонансно заземлених мереж. Представлені тут результати базуються на двох мережах, показаних на рисунку 2.4.

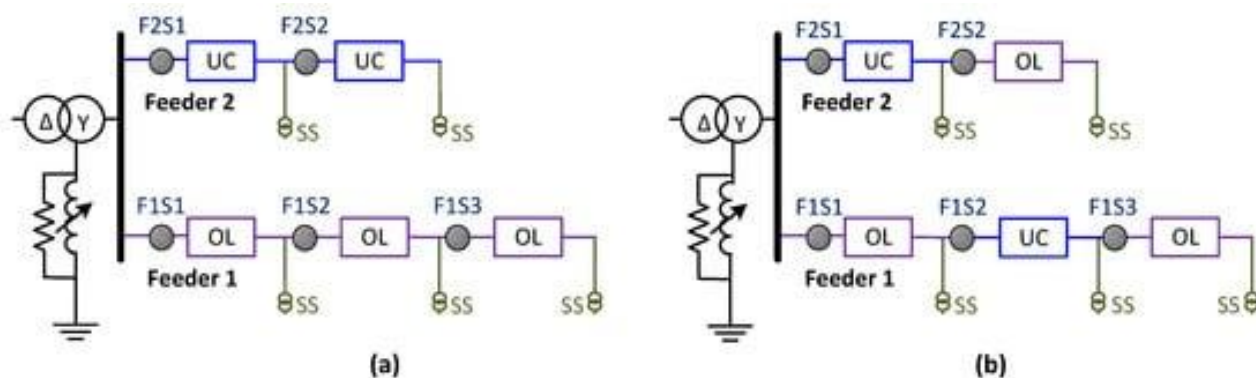


Рисунок 2.4. – Змодельовані мережі: (а) з однорідними фідерами (б) зі змішаними фідерами. Фідерні ділянки визначаються розташуванням вторинних підстанцій (ПС)

Перший має однорідні фідери, тобто фідери, які містять або повністю повітряні лінії, або повністю підземні кабелі. Другий має змішані (гетерогенні) фідери, що містять як повітряні лінії, так і підземні кабелі. Кожна з цих показаних мереж має два фідери. F1S1, F1S2 та F1S3 – це розташування FPI у фідері 1, на початку секцій фідера 1–3 відповідно. Розташування F2S1 і F2S2 називаються аналогічно для другого фідера.

Ці тестові мережі були обрані з ширшого спектру змодельованих мереж, щоб надати чітку демонстрацію ефективності запропонованого методу в різних сценаріях. Метод також був протестований для фідерів з декількома відгалуженнями, які, як було виявлено, мали незначний вплив за межі того, що можна побачити з двох мереж на рисунку 2.4, дивлячись на різні місця FPI з різними комбінаціями лінії та кабелю в п'яти секціях дві годівниці. Для обох мереж номінальна напруга в лінії становить 22 кВ, а загальне під'єднане навантаження становить близько 7,025 МВт (коефіцієнт потужності 0,9 із затримкою), розподілене між п'ятьма вторинними підстанціями (ПС). Котушка Петерсена налаштована на перекомпенсацію на 10 А, а резистор, приєднаний паралельно котушці, забезпечує 3 А під впливом номінальної фазної напруги системи.

Для мережі з однорідними фідерами Фідер 1 має протяжність 30 км з довжиною ділянок 10,5 км, 16,5 км та 3 км. Фідер 2 має протяжність 20 км з двома рівними ділянками по 10 км. Для мережі зі змішаними фідерами різниця порівняно з однорідною мережею полягає лише в тому, що друга секція кожного з фідерів міняється місцями. Отже, як однорідна, так і змішана мережі мають однаковий ємнісний зарядний струм, який становить 56 А.

Реалізація PSCAD використовує ПП-модель ліній перетину. Це просто, але достатньо, оскільки запропонований метод використовує вектори основної частоти, а довжини ділянок електрично дуже короткі для цієї частоти. Моделювання проводилося з кроком часу вирішення 50μс. Однак, щоб представити просту систему вимірювань, значення струму, відібрані лише на частоті 1 кГц, були записані зі згаданих місць FPI для подальшого аналізу в Matlab. Параметри повітряних ліній і кабелів наведені в таблиці 1 і базуються на значеннях, використаних для цього типу дослідження спонсором комунального підприємства.

Таблиця 2.1. – Параметри мережі

Тип		опір	індуктивність	ємність
		(Ω/км)	(мГн/км)	(нФ/км)
Кабелі	+ve seq.	0,319	0,37	219.9
	нульовий посл.	1,258	5.1	219.7
лінія	+ve seq.	0,21	1.1	11.05
	нульовий посл	0,67	4.8	3,95

2.6.1. Продуктивність для різних типів мереж: лінія, кабель, змішана

Традиційно розподільні фідери являли собою або повітряні лінії з відкритим дротом, або підземні кабелі, з невеликою кількістю або без суміші.

Повітряні лінії поширені в сільських мережах, тоді як кабелі поширені в міських районах. Збільшується кількість змішаних фідерів із значною часткою як повітряних ліній, так і кабелів, особливо в скандинавських країнах. Головною рушійною силою цього є вимога підвищеної надійності сільських мереж у погану погоду. Це призвело до того, що повітряні лінії замінюють більше підземних кабелів. Крім того, у густо лісистих районах стало звичайним використовувати повітряні ізольовані кабелі замість відкритих ліній, щоб підвищити надійність, зберігаючи лінію видимою та уникаючи копання.

Підземні або повітряні кабелі збільшують зарядну ємність у багато разів порівняно з відкритими лініями, як видно з таблиці 2.1. Тому для однорідного фідера співвідношення між величинами ємнісних струмів і струмом навантаження сильно відрізняється для кабелів порівняно з лініями. Важливо перевірити надійність запропонованого методу для різних типів мережевих фідерів з їх різною ємністю, а також для сумішей.

2.6.1.1. Мережі з однорідними фідерами

Мережа, показана на рисунку 2.4 а, використовується тут як приклад із однорідними фідерами. На рисунку 2.5 показано результати для суцільного замикання на землю в середині другої секції фідеру з повітряними лініями між F1S2 і F1S3.

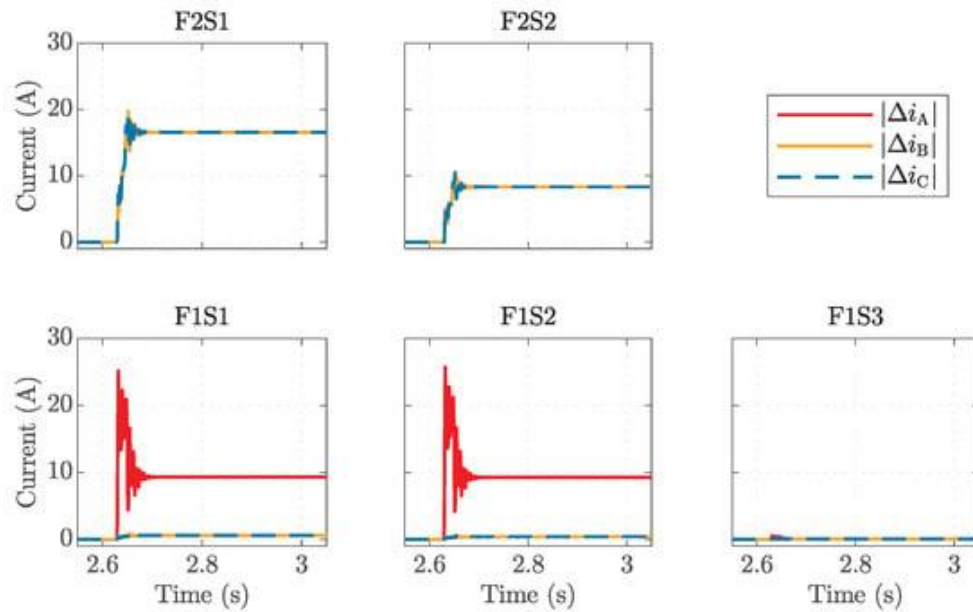


Рисунок 2.5. – Результати для твердого замикання на землю між F1S2 і F1S3 мережі, показаної на рисунку 2.4 а. Несправна ділянка містить повітряні лінії

Помилка виникає через 2,61 с, а зміни величин струму трьох фаз однакові для FPI у фідері 2 (F2S1 і F2S2). На відміну від цього, для фідера 1 зміни величин струму не однакові для секцій фідера 1 і 2, але вони є для секції фідера 3. Таким чином, несправність виявляється в секції фідера 2, оскільки F1S3 розташований на початку Фідерна секція 3. Величини змін у струмах здорової фази менші у фідері 1, ніж у фідері 2, оскільки фідер 2 містить кабелі.

Для тієї ж мережі на рисунку 2.6 показано результат, коли суцільне замикання застосовується в першій секції фідера 2, який складається з кабелів. Зміни величин струму не видно для фідера 1, оскільки всі вертикальні осі масштабуються, щоб бути узгодженими та враховувати значення для фідера 2. Зміни для F2S1 не однакові протягом усього періоду. Однак для F2S2 зміни не є однаковими відразу після виникнення несправності, але потім вони стають однаковими. Тому рішення про запропонований метод не слід приймати на основі інформації про перехідний період. Частота дискретизації, яка використовується в аналізах, становить 1 кГц, чого недостатньо для надання надійної інформації під час перехідних періодів.

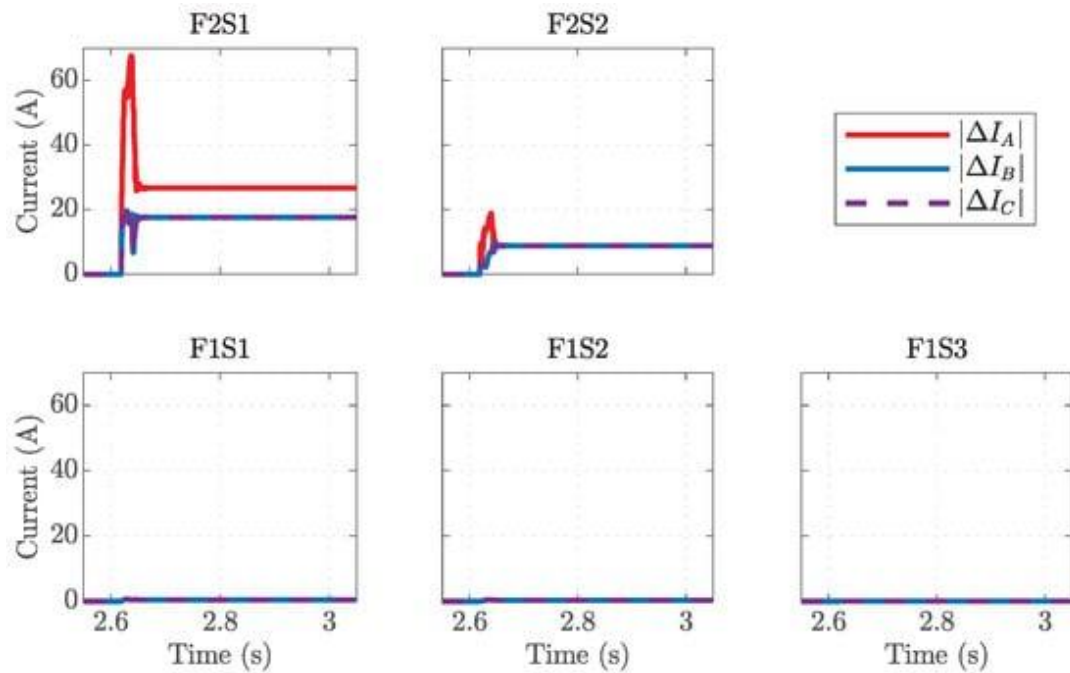


Рисунок 2.6. – Результати для твердого замикання на землю між F2S1 і F2S2 мережі, показаної на рисунку 2.4 а. Несправна частина містить кабелі

2.6.1.2. Мережі зі змішаними пристроями

Мережа, показана на рисунку 2.4, б, використовується для перевірки ефективності запропонованого методу в змішаних кормороздавачах. Третя секція фідера 1 містить повітряні лінії. На рисунку 2.7 показані результати для суцільного замикання на землю на повітряній лінії в кінцевій частині фідера 1. Для всіх FPI у фідері 1 величини зміни струму не однакові між фазами. Це означає, що несправність у фідерній секції 3, між останнім FPI (F1S3) і кінцем мережі.

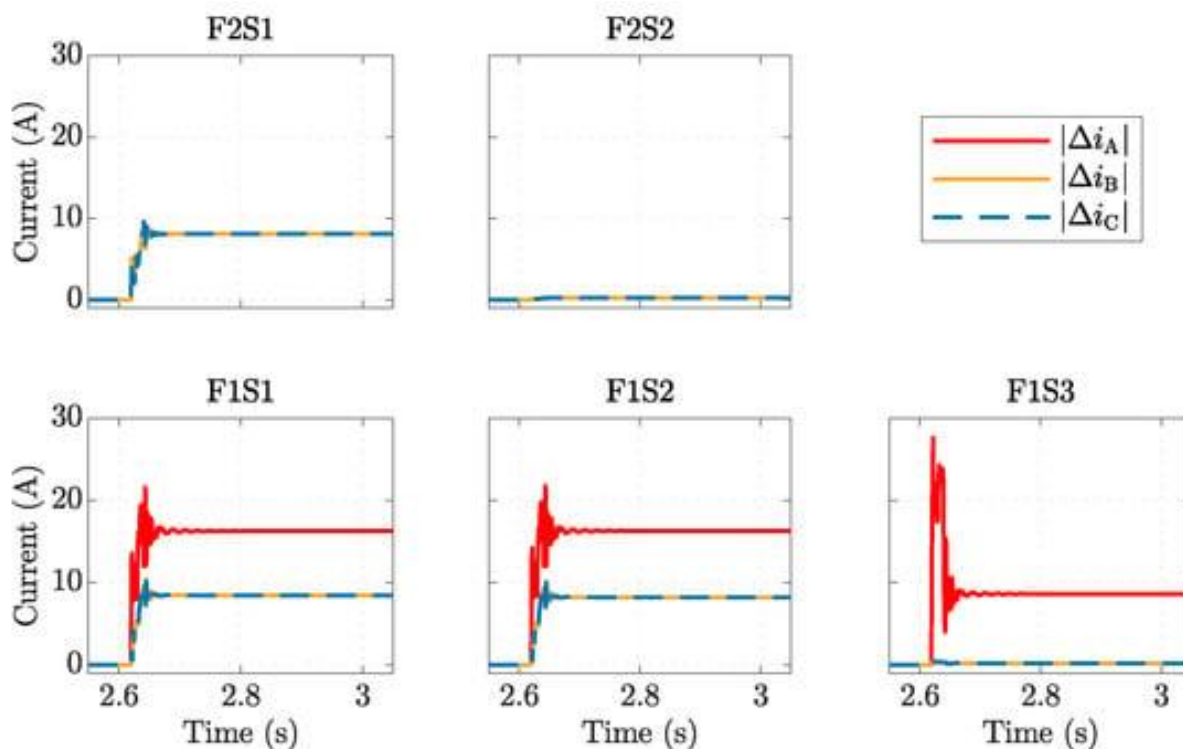


Рисунок 2.7. – Результати для твердого замикання на землю між F1S3 і фідером мережі, показаного на рисунку 3.4 б. Несправна ділянка містить повітряні лінії

Хоча перша секція фідера 1 містить повітряні лінії, через неї протікає високий ємнісний струм, оскільки друга секція складається з кабелів. Третя секція є останньою частиною фідера, і вона містить повітряні лінії. Тому зміни для здорових фаз більші для F1S1 і F1S2 порівняно з F1S3. Для другого фідера зміни в першій секції більші, ніж у другій секції, оскільки перша секція цього фідера містить кабелі, тоді як друга секція містить повітряні лінії. Однак для обох ділянок величини змін усіх фазних струмів майже однакові, оскільки фідер 2 належить до справної частини мережі.

На рисунку 2.8 показано результати для твердого замикання на землю в першій секції фідера 2. Ця секція містить кабелі в цьому змішаному фідері. Зміна здорових фазних струмів майже подібна до випадку з несправністю фідера 1 (рис. 2.7). Ця характеристика показує, що зміни в працездатних фазах в основному пов'язані з кількістю зарядного струму, що протікає через місце живлення під час несправності. Однак величина зміни для струму несправної

фази вища, ніж для здорових фаз для F2S1, але не для F2S2. Це означає, що несправність знаходиться між цими двома точками вимірювання.

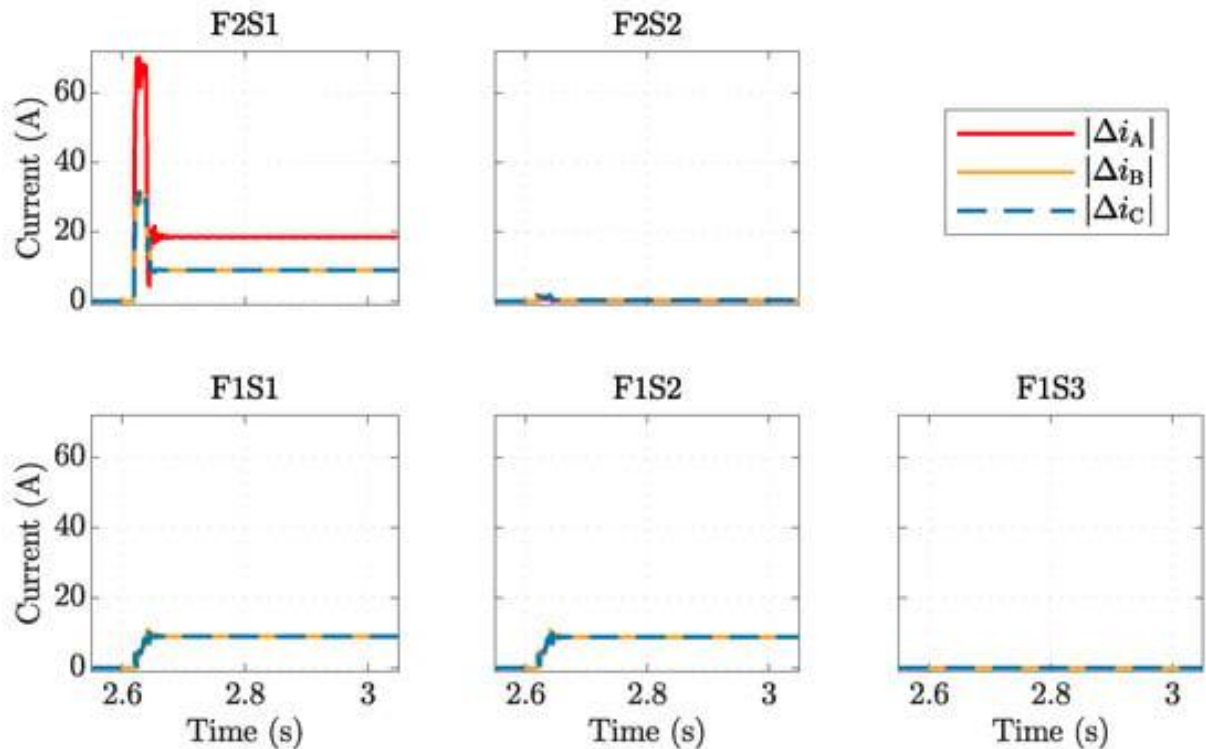


Рисунок 2.8. – Результати для твердого замикання на землю між F2S1 і F2S2 мережі, показаної на рисунку 4 б. Несправна частина містить кабелі

2.6.2. Вплив стійкості до несправностей

Більшість несправностей у системах розподілу включають опори різної величини. Важливо, щоб система могла ідентифікувати резистивні замикання, щоб забезпечити безпеку в оточенні місця замикання на землю. В Україні замикання на землю до 4 kΩ. Стійкість до збоїв повинна бути визначена та автоматично очищена протягом 5 с, якщо будь-яка частина мережі містить повітряні лінії. Таким чином, будь-яка постійна несправність до цього опору потребує пошуку та усунення несправності, щоб мати можливість відновити роботу всіх клієнтів. Таким чином, запропонований метод перевірений навіть для 5 тис. Ω стійкість до несправності в змішаних фідерах.

На рисунку 2.9 показано результати для 5 kΩ замикання на землю в третій секції фідера 1, який входить до складу змішаного фідеру з повітряними

лініями. Для того, щоб спостерігати вплив стійкості до пошкодження, цю цифру можна порівняти з рисунком 2.7 (суцільне пошкодження), оскільки всі інші деталі в цих двох випадках однакові. Величина найбільшої зміни зменшилася з приблизно 28 А до 4 А. Різниця між змінами здорових фаз і змінами несправної фази також зменшилася з приблизно 18 А до приблизно 2 А. Це зменшення може виступати як вирішальний фактор чутливості запропонованого методу. Наприклад, зміни навантаження протягом кількох циклів після виникнення несправності легше порушать рішення FPI, якщо зміна, яку шукає FPI, є слабкою.

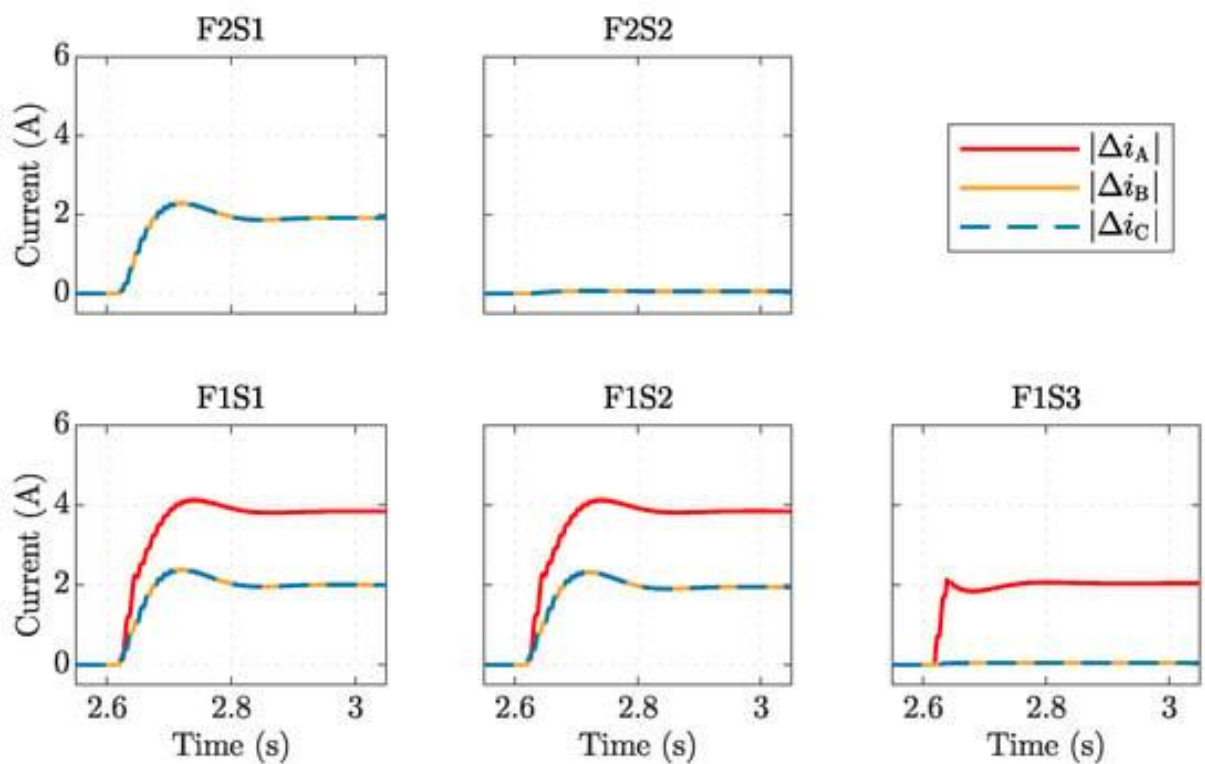


Рисунок 2.9. – Результати для 5 тисΩΩрезистивне замикання між F1S3 і фідерним кінцем мережі, показано на рисунку 4 б. Несправна ділянка містить повітряні лінії

2.6.3. Залежність від резистивного струму в нейтралі

Опір, паралельний котушці Петерсена, можна використовувати різними способами. Високий опір, який дає лише кілька ампер резистивного струму, можна залишити нормально підключеним. Це допомагає обмежити зміщення нейтралі під час нормальної роботи та дозволяє використовувати ватметричний метод системами захисту для ідентифікації несправного фідера. У деяких країнах після виявлення постійної несправності може бути підключено набагато нижчий опір, щоб увімкнути роботу запобіжників або просто визначити несправність. У Швеції практикується використання лише високого опору, який залишається підключеним під час нормальної роботи та під час несправностей.

Вплив резистивного струму показано тут для мережі з однорідними фідерами, з $5\text{ k}\Omega$ опір замикання у фідері повітряної лінії між F1S2 і F1S3. На рисунку 2.10. показаний корпус із нейтральним резистором, підключеним паралельно котушці, налаштованим на внесення резистивного струму 3 A при твердому замиканні на землю; така ситуація була і для раніше вивчених випадків.

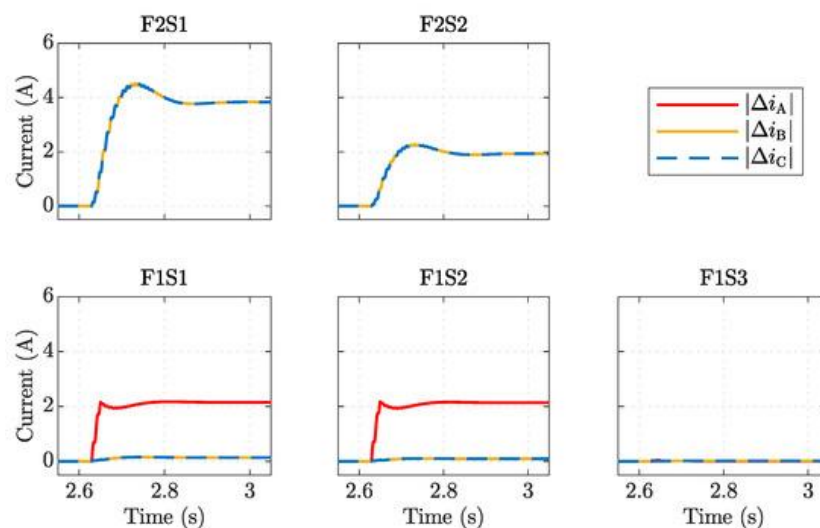


Рисунок 2.10. – Результати для $5\text{ тис } \Omega$ резистивний замикання між F1S2 і F1S3 мережі, показаної на рисунку 2.4 а. Мережа має опір паралельно котушці Петерсена

Рисунок 2.11 відрізняється лише тим, що немає нейтрального резистора. Струм пошкодження досягає стаціонарного стану раніше, коли резистор підключений до нейтралі. Визначити несправну ділянку запропонованим методом можна в обох випадках: з резистором і без нього. Отже, на відміну від ватметричного методу, метод не залежить від резистивного струму від заземлення системи, крім того, не вимагає вимірювання напруги.

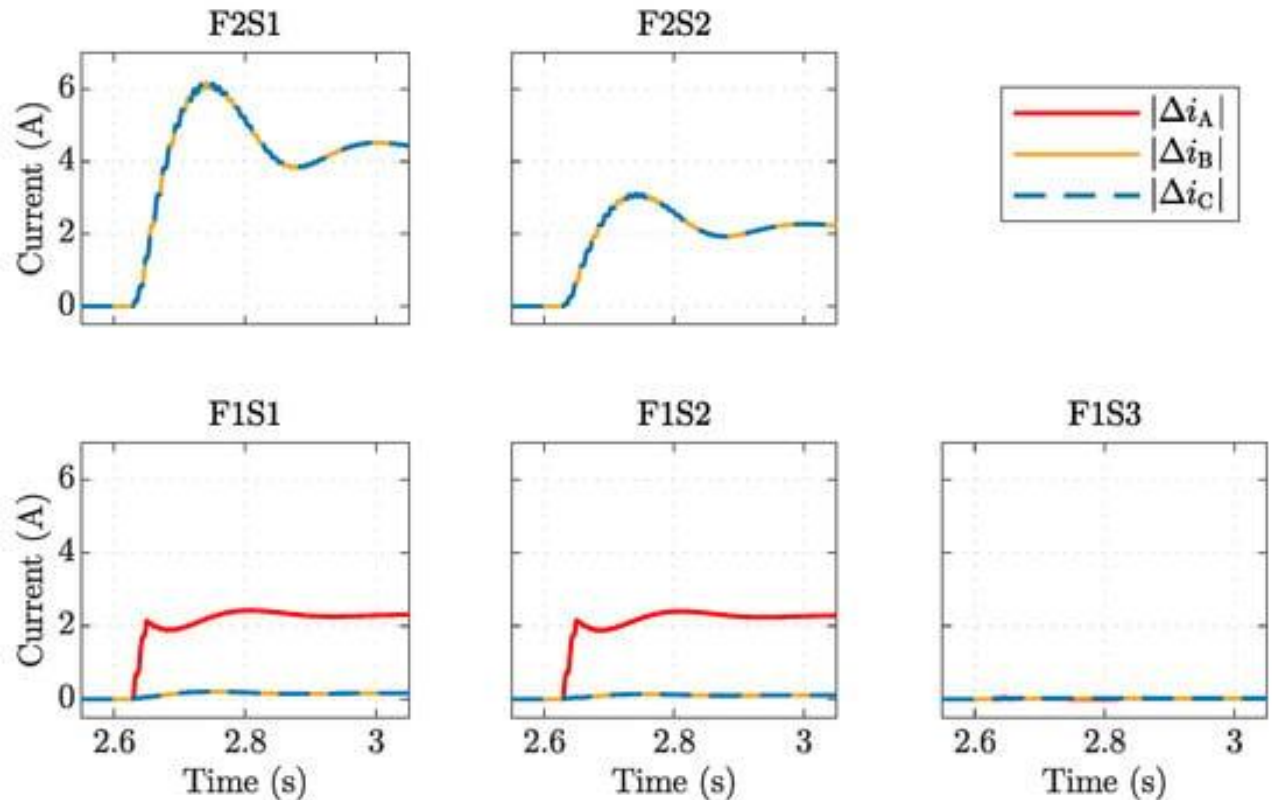


Рисунок 2.11. – Результати для 5 тис Ω резистивний замикання між F1S2 і F1S3 мережі, показаної на рисунку 2.4 а. Паралельно з котушкою Петерсена опору немає

2.6.4. Вплив природного дисбалансу в мережах

Асиметрії існують під час нормальної роботи в розподільчих системах і, отже, зміщення напруги нейтралі. Це впливає на кут напруги нульової послідовності під час несправності. Ватметричний метод може виявитися недостатнім для розрізнення несправних і здорових частин системи, якщо асиметрія досить велика. Рисунок 2.12 показує одну з таких умов.

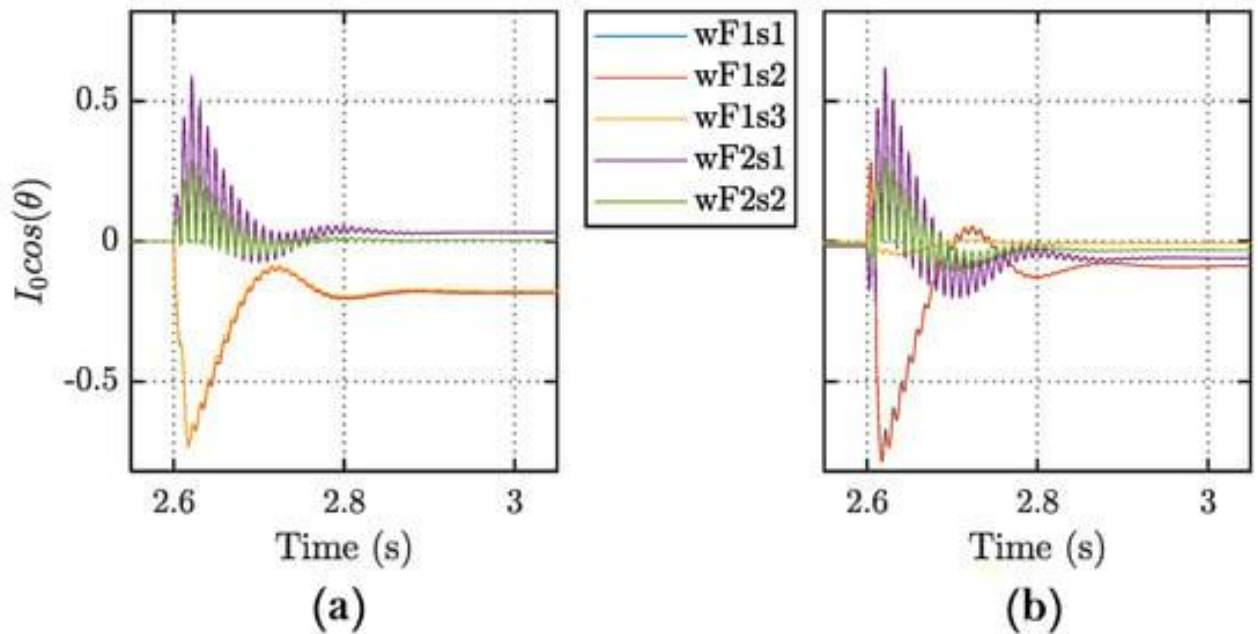


Рисунок 2.12. – Результати для традиційного ватметричного методу для 5кΩ несправність між F1S2 і F1S3: (а) для симетричної мережі та (б) для мережі з природним дисбалансом $\pm 1\%$

Вертикальні осі показують резистивну частину струму нульової послідовності, $I_0 \cos(\theta)$ тому що I_0 – величина струму нульової послідовності і θ це кут між напругою нульової послідовності та струмом нульової послідовності. Щоб імітувати природний незбалансований стан, ємність фази А збільшується, а фази С зменшується на 1% від збалансованого стану. Результати на рисунку 2.13 наведені для тих самих умов, що й на рисунку 2.12 б, і це показує, що на запропонований метод не впливає сильно асиметрія мережі.

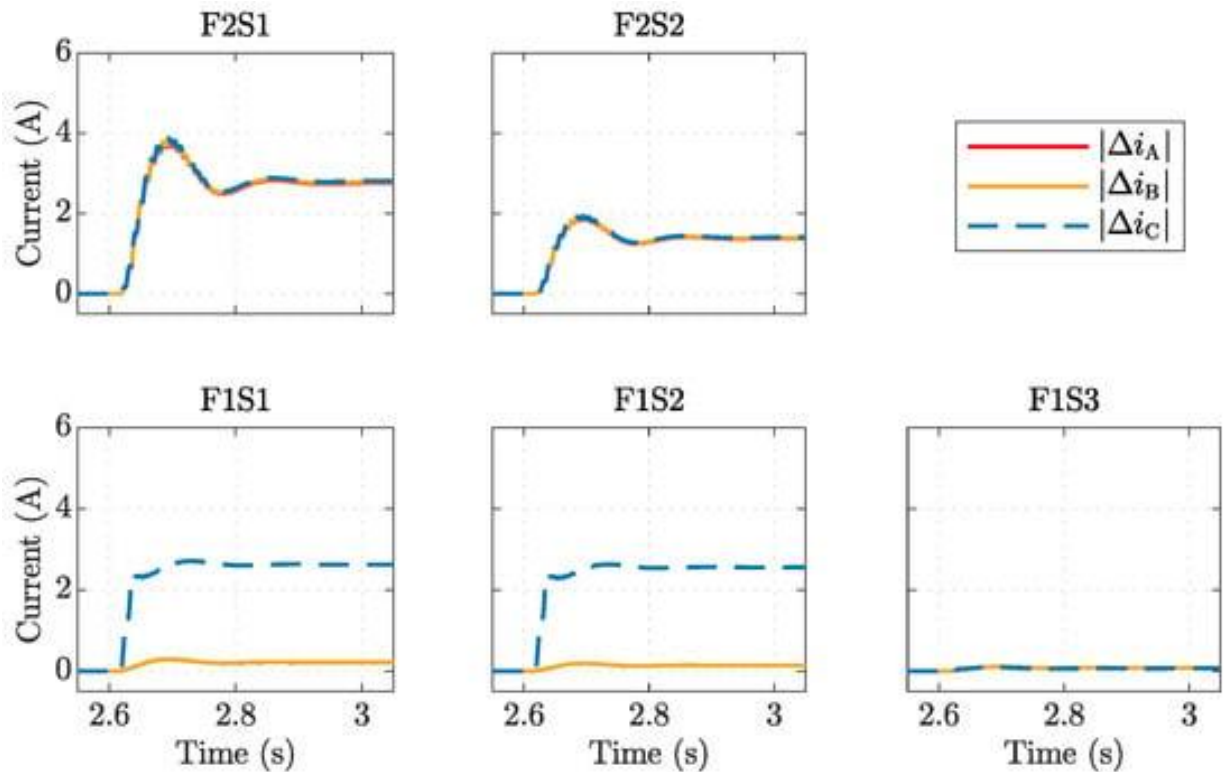


Рисунок 2.13. – Вплив асиметрії мережі на запропонований метод для 5 тис Ω несправність між F1S2 і F1S3. Конфігурація мережі така ж, як на рисунку 2.12 б

2.6.5. Вплив розташування та ступеня компенсації в мережі

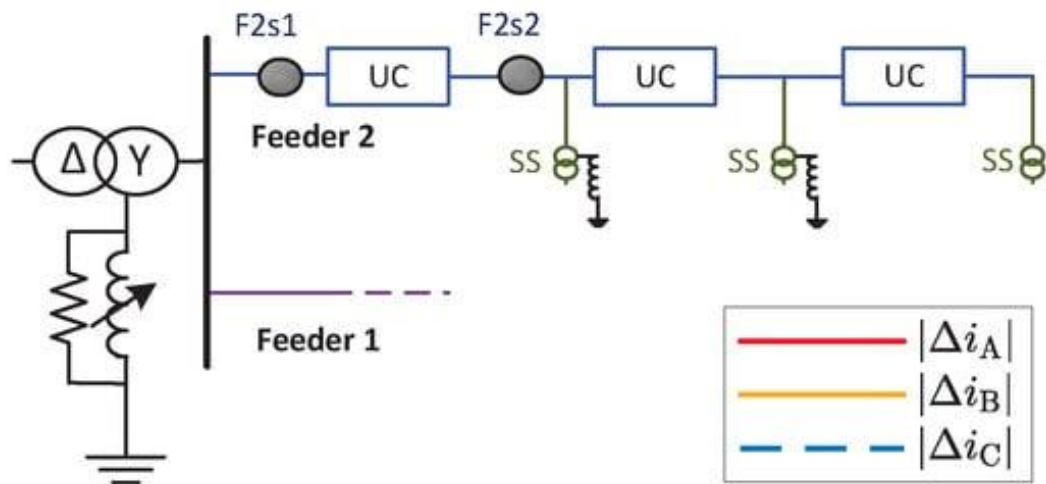
Вищезазначені випробування враховували один рівень надмірної компенсації, причому компенсація була забезпечена повністю на нейтралі одного трансформатора, який живить мережу. Наступні тести розглядають деякі різні випадки практичного значення.

2.6.5.1. Розподілена компенсація

Розподілена компенсація розподіляє компенсаційну індуктивність між різними точками мережі. Типова реалізація полягає в тому, що одна регульована центральна котушка компенсує частину мережі та регулює ступінь компенсації, тоді як кілька заземлених зигзагоподібних обмоток

трансформатора з фіксованими значеннями розподілені по всій системі для локальної компенсації віддалених частин мережі. Цей розподілений підхід був описаний навіть у патенті Петерсена [31], але його впровадження у Швеції було нещодавно зумовлене переходом до використання кабелів для заміни навіть довгих ліній у сільській місцевості [53]. Раніше кабельні мережі були в міських районах, де висока щільність навантаження обмежує загальну довжину кабелю, який можна знайти в мережі. Розподілена компенсація є кращим вибором для мереж, які мають довгі фідери з кабелями, де послідовний опір стає значним як частка шунтової ємнісної реактивності.

Фідер 2 мережі, представленої на рисунку 2.4 а, використовується як приклад. Перша секція і фідер 1 компенсуються центральною котушкою, а друга секція розділена на дві рівні частини і компенсується двома локальними компенсаційними котушками однакового розміру. Це розташування показано на рисунках 2.14 і 2.15. Несправність знаходиться між F2S2 і кінцем фідера, і має опір 5 кОм Ω .



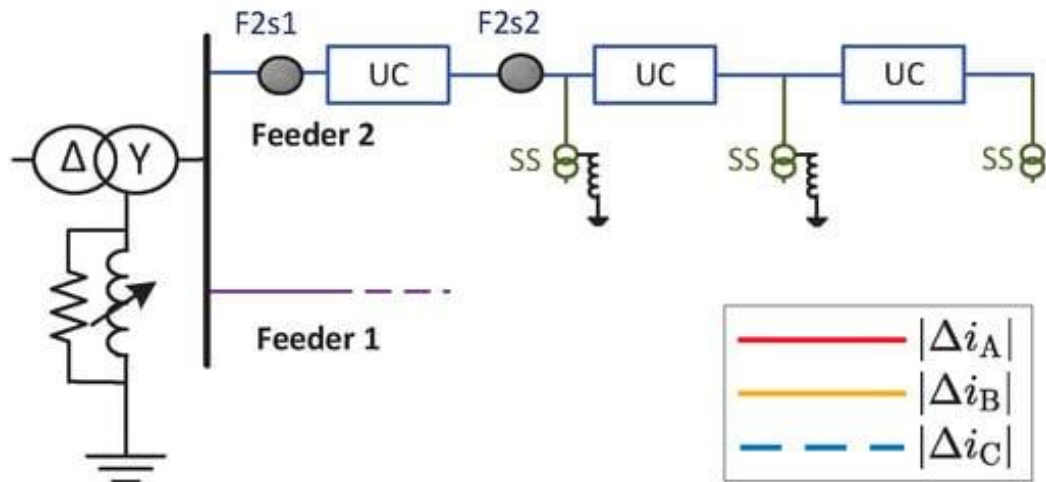
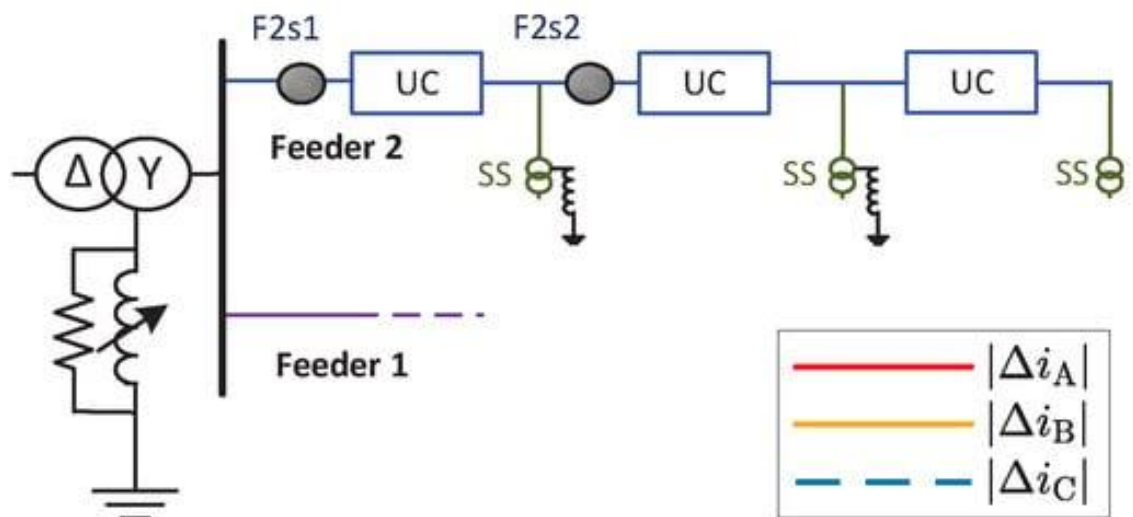


Рисунок 2.14. – Розподілена компенсація впливу на запропонований метод для 5 тис Ω несправність між F2S2 і фідером. F2S2 розташований перед місцевими компенсаційними котушками

На рисунку 2.14 – показано результати, коли F2S2 розміщено перед цими двома компенсаційними котушками. Зміни для здорових фаз є помірними, оскільки ємнісні струми для решти частини фідера не перетинають це місце.



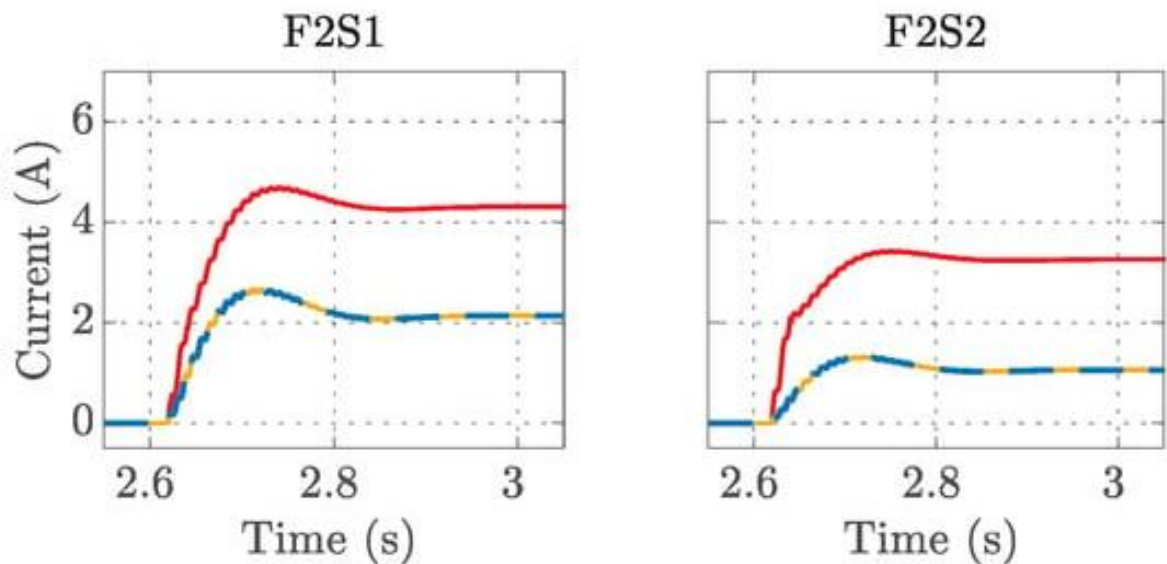


Рисунок 2.15. – Розподілена компенсація впливу на запропонований метод для 5 тис Ω несправність між F2S2 і фідером. F2S2 розташований між двома локальними компенсаційними котушками

На рисунку 2.15 показано випадок, коли F2S2 розміщено одразу після однієї з цих двох локальних компенсаційних котушок. Тепер через F2S2 проходять ємнісні струми 5 км кабелів, тому зміни для здорових фаз майже вдвічі менші, ніж для F2S1. Запропонований спосіб показує задовільні результати в обох умовах.

2.6.5.2. Недостатня компенсація

Хоча резонансно заземлені системи найчастіше працюють у компенсованих умовах, деякі з них працюють у недостатньо компенсованих умовах [51]. Мережа може стати недостатньо компенсованою через збої в механізмі налаштування котушки Петерсена або збій будь-якої з розподілених котушок у разі розподіленої компенсації.

Тому цікаво перевірити ефективність методу з недостатньою компенсацією, хоча це не так важливо, як надмірна компенсація. З цією метою

змішана мережа (з чисто центральною компенсацією) налаштована на недокомпенсацію 10 А, а несправності застосовуються в різних секціях фідера.

На рисунку 2.16 показано результати при 5 k Ω стійкість до несправності застосовується після F1S3. Зміни в величинах струму не однакові на проходженні несправності, але зміна для несправної фази є меншою, ніж зміна здорових фаз. Це більш помітно, коли рисунок 2.16 порівнюється з рисунком 9, оскільки всі інші умови однакові для цих двох випадків, за винятком ступеня компенсації.

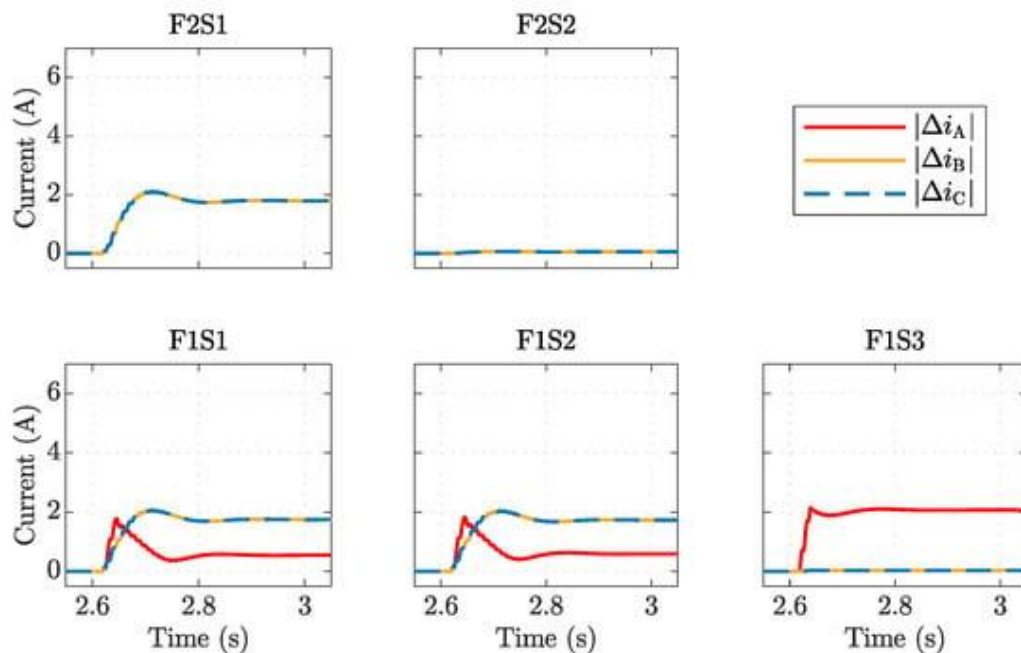


Рисунок 2.16. – Вплив ступеня компенсації мережі на запропонований метод для 5 тис Ω несправність між F1S3 і кінцем фідера 1

У цьому випадку мережа недокомпенсована, тому струм пошкодження є ємнісним. Зміна струму несправної фази через замикання на землю виглядає як індуктивна, оскільки вона виникає головним чином через зменшення ємнісного струму. Струм несправності (ємнісний), що протікає від початку фідера, додається до цього зменшеного зарядного струму (індуктивного) протягом усього проходження несправності. У результаті величина зміни струму несправної фази стає меншою для недостатньо компенсованих мереж порівняно з надкомпенсованими мережами.

Щоб продемонструвати вплив цієї функції, на рисунку 2.17 показаний приклад із компенсацією на 10 А, реалізованою шляхом зменшення довжини другої секції фідера 1 з 10 км до 5,5 км для зменшення зарядного струму. Тоді метод не визначає, що F1S1 і F1S2 знаходяться на проході замикання, оскільки зміни для трьох фаз майже однакові: це неправильне рішення. Зміни для несправних і справних фаз можуть стати однаковими залежно від ступеня компенсації та величини зарядного струму в місці розташування FPI на фідері.

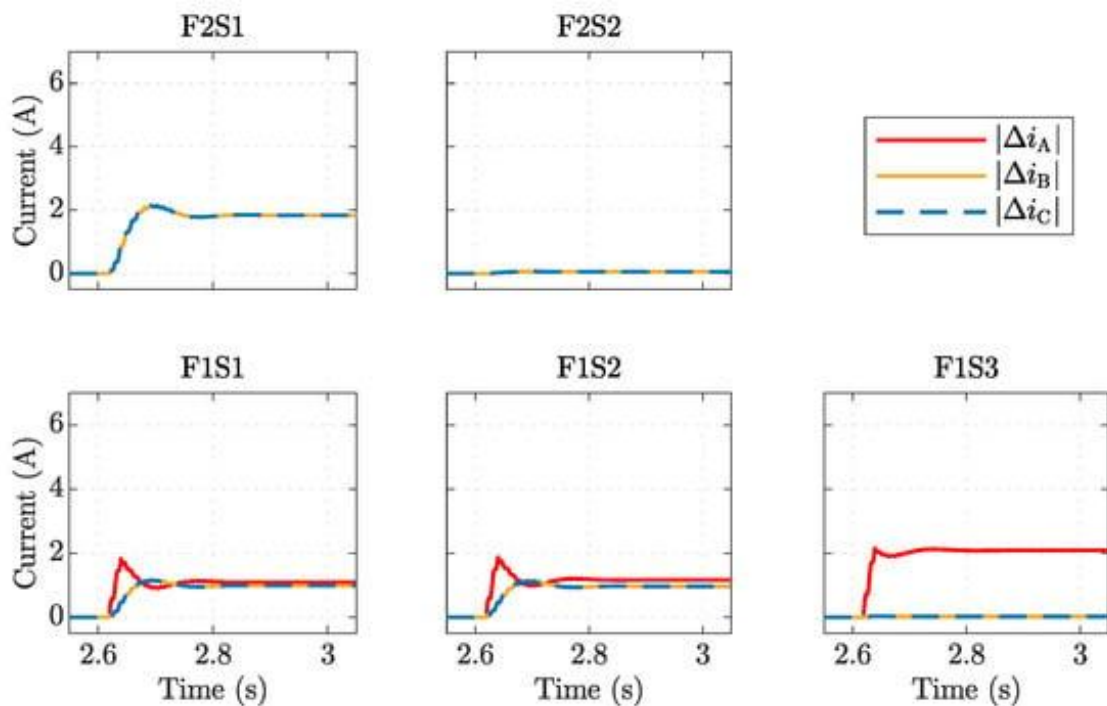


Рисунок 2.17. – Вплив ступеня компенсації мережі на запропонований метод для 5 тис Ω замикання між F1S3 і кінцем фідера 1. Довжина кабелю зменшена з 10 км до 5,5 км для секції фідера 2

Таким чином, запропонований метод не дуже підходить для недостатньо компенсованих мереж, які вимагають подальшого дослідження. Ця робота зосереджена на мережах із надмірною компенсацією, що є типовою ситуацією у країнах Євросоюзу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Ідентифікація проходження замикання є складною для резонансно заземлених систем, оскільки величина струму замикання досить мала навіть порівняно зі струмами навантаження, а також через те, що струм нульової послідовності тече по всій системі під час замикання на землю.

Запропонований метод FPI спрямований на простоту та низьку вартість шляхом використання лише поточних вимірювань в одному місці з відносно низькою частотою дискретизації 1 кГц. Він також не вимагає включення або зміни опору заземлення під час замикання. Ці моменти дають можливість знизити вартість, ніж для кількох інших підходів.

Метод показав хорошу вибірковість для перекомпенсованих мереж. Однак було показано, що у систем з високими ємнісними струмами, що працюють у недостатньо компенсованих умовах, є проблеми з надійністю. Перегляд змін у кутах замість величин може забезпечити надійні результати в таких ситуаціях; Подальші дослідження можуть зосередитися на цьому.

Досліджувані тут тестові випадки мали несправність, реалізовану як комутований імпеданс. Не було випробувань несправностей, які призводять до різких перехідних процесів струму, таких як переривчасте дугове замикання.

У тестовій реалізації з основною частотою 50 Гц і частотою дискретизації 1 кГц вектори були розраховані з вікон з 20 точок вибірки, тобто 1 цикл. Початкові точки вікон, що використовуються для обчислення векторів до і після розлому, розділені цілим числом, кратним довжині вікна, щоб порівняти вектори з правильними відносними кутами. Якщо системна частота відхиляється від 50 Гц, під час порівняння виникне фазова помилка, пропорційна відхиленню частоти та кількості довжин вікон поділу. Наскільки це може вплинути на результати, частково залежить від струмів навантаження в місці FPI, оскільки навіть постійне навантаження сприятиме зміні вектора між двома вимірюваннями, які мають помилковий відносний зсув відносної фази. У дуже великій енергетичній системі, такій як система континентальної Європи

(зазвичай контролюється в межах ± 25 мГц), частота майже в усі моменти часу, крім коротких, екстремальних збурень, дає лише до 1° фазова помилка, коли вектори порівнюються між часами, розділеними двома довжинами вікна (40 мс). Однак менші системи мають більші смуги нормальної варіації: наприклад, деякі з них у 4 рази більші в скандинавській синхронній системі, а також можна знайти набагато менші острівні системи. Також може знадобитися більша кількість періодів, що розділяють порівнювані вікна. Тому для надійного практичного впровадження методу рекомендується деяке пом'якшення. Прикладом проектного пом'якшення є безперервне вимірювання фактичної частоти та, виходячи з цього, застосування фазової компенсації після виконання ДПФ або регулювання частоти дискретизації пропорційно частоті системи.

Метод заснований на порівнянні векторів між різними часами до і після виникнення замикання на землю, позначених індексами 1 і 2 у рівнянні (2.4). Якщо в цьому ж інтервалі відбувається значна зміна навантаження, чутливість методу можна зменшити з 5 к.с. Ω стійкість до несправності до нижчого значення залежно від величини, фазового кута та балансу фаз зміни.

Стосовно наведених вище ефектів неномінальних змін частоти та навантаження, слід пам'ятати, що FPI спрямовані на підвищення надійності постачання економічним шляхом; вони не є критично важливою функцією захисту, неправильна робота якої становить небезпеку. Випадковий поганий результат через зовнішні джерела перешкод може бути кращим за співвідношенням витрати/вигоди порівняно з альтернативою, яка дозволяє уникнути рідкісних проблем за рахунок включення додаткових вимірювань або складності.

Розташування на проході розлому та поза ним перевіряються, оскільки хибнопозитивний або хибнонегативний результат FPI, ймовірно, збільшить час, необхідний для визначення місця розлому. При використанні FPI секція, яка вважатиметься несправною, розмежовується на верхньому кінці останнім FPI, який повідомляє про проходження несправності (або вихідною підстанцією), і на нижньому кінці першим FPI, який не повідомляє (або до кінця рядка).

Неправильний результат одного FPI може в деяких випадках спричинити пошук не в тому розділі рядка.

У розділы показано рисунок для кожного представленого тесту. Кожна фігура має підділянки для п'яти перевірених місць FPI у досліджуваній мережі. Кожен підділянок має одну позначену криву на фазу $|\Delta i_x|$, що є величиною зміни вектора струму в фазі x . З обраною частотою дискретизації 1 кГц на мілісекунду припадає одна точка. Значення, нанесене на графік у кожному точку часу, базується на фундаментальній складовій ДПФ 1 циклу (20 зразків вимірювання), що закінчується в цей момент, за вирахуванням ДПФ вибраного передавального циклу. Якщо між цими двома порівнюваними циклами немає цілої кількості циклів, для отримання правильної різниці фаз застосовується відповідний кутовий зсув.

Якщо не вказано інше, система має надкомпенсацію на 10А, а опір у нейтралі паралельно котушці Петерсена вибрано для забезпечення максимального резистивного струму 3А.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

У роботі пропонується індикація проходження несправності, яка використовує величину змін вектора фазних струмів між моментами часу безпосередньо перед і після виникнення несправності. В рамках магістерської роботи представлена теорія методу, представлений алгоритм методу, описані змодельовані мережі та процес дослідження методу. Крім того, показана продуктивність методу для кількох випадків, і зроблені висновки.

Тестування за результатами моделювання показало хороші перспективи запропонованого методу в мережах, що працюють в умовах надкомпенсації. Метод ненадійний для недостатньо компенсованих мереж; потрібне подальше дослідження, зосереджене на цьому питанні.

Перевага цього методу порівняно з деякими іншими доступними реалізаціями FPI полягає в тому, що він працює з дуже мінімальним введенням інформації: лише фазні струми в місці FPI, вибірка з частотою 1 кГц. Це на відміну від методів, які також вимагають вимірювання напруги, вимірювання з кількох місць, вимірювання високочастотних перехідних процесів або змін опору заземлення нейтралі.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України : Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
3. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
4. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665-III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
8. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80> .

9. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021-2030 роки: Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
10. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
11. Сайт світової енергетичної ради [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.worldenergy.org/document/ethiopia_june_30_v_gbeddy_security.pdf.
12. Міжнародне енергетичне агентство [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.iea.org/subjecttcqueries/keyresult.asp?KEYWORD_ID=4103
13. Микитенко В. В. На чому базується енергетична безпека держави/В.В. микитенко// Вісник НАН України. – 2005. - № 3. – С.41-47.
14. A Model for Hourly Solar Radiation Data Generation from Daily Solar Radiation Data Using a Generalized Regression Artificial Neural Network / T. Khatib, W. Elmenreich // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy Volume 2015, Article ID 963024, 13 pages
15. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition / J.A. Duffie, W.A. Beckman, 2013 P. 910
16. Hybrid solar and wind power: an essential for information communication technology infrastructure and people in rural communities / L.A. Adejumo, S.G. Oyagbinrin, F. G. Akinboro & M.B. Olajide // IJRRAS 9(1) – October 2011– P.130-138
17. Hybrid power generation system / Gagari Deb, Ramananda Paul, and Sudip Das // International Journal of Computer and Electrical Engineering. Vol.4. No. 2. April 2012 – P. 141-144
18. Configuration of a standalone hybrid wind-diesel photoelectric unit for guaranteed power supply for mineral resource industry facilities / A.A. Belsky,

- A.N. Skamyin, E.V. Iakovleva // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11. Number 1 (2016) – P. 233-238
19. Optimal Sizing of a Hybrid Grid-Connected Photovoltaic-Wind-Biomass Power System /Arnan Gonzalez, Jordi-Roger Riba and Antoni Rius // Sustainability 2015. 7. P. 12787-12806
 20. Cost Benefit Analysis of Self-Optimized Hybrid Solar- Wind-Hydro Electrical Energy Supply as compared with HOMER Optimization / A. Amevi, B.H. Essel, B.M. Mathias // International Journal of Computer Applications (0975 - 8887) Vol. 114-No. IS. March 2015 P. 32-38
 21. A Simple Sizing Optimization Method for Wind- Photovoltaic-Battery Hybrid Renewable Energy Systems / S.M.R. Tito, T.T. Lie, T. Anderson – 2013 P. 8-13
 22. Simulation and Optimization of Independent Renewable Energy Hybrid System / Anita Gudelj and Maja Krcum // Trans marit. sci. 2013; 01. P. 28-35
 23. <https://www.meteo.gov.ua>, <https://worldweather.wmo.int/en/home.html>
 24. NASA Surface meteorology and Solar Energy – Location. Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>
 25. A Model for Hourly Solar Radiation Data Generation from Daily Solar Radiation Data Using a Generalized Regression Artificial Neural Network / T. Khatib, W. Elmenreich // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy Volume 2015, Article ID 963024,13 pages
 26. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Херсон>
 27. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition / J.A. Duffie, W.A. Beckman, 2013 P. 910
 28. Целочисленное программирование в Matlab. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html> _____ свободный (Дата звернення 02.05.2017)
 29. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
 30. <https://www.atmosfera.ua/for-home/hibrydni-soniachni->

[stantsii?utm_source=google&utm_medium=performance&utm_campaign=pmax
&utm_term=&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAgeeqBhBAEiwAoDDhn1J904
WozY0jTggpOUT-58fkGGue4dkRru-
1Iewdgc9mEar9qyaHRhoCHT4QAvD_BwE](https://patents.google.com/patent/US1537371A/en)

31. Petersen, W. Protection of Alternating Electric Current Systems. U.S. Patent 153737, 8 May 1918. Notes: Granted 12 May 1925. Although Not Clear from the Title, this Patent is Specifically about Resonant System-Earthing. Associated German and Dutch Patents Were Filed in January 1917; the Act of Invention Presumably Happened in 1916. Available online: <https://patents.google.com/patent/US1537371A/en> (accessed on 17 November 2022).
32. Petersen, W. The Limitation of Earth Fault Current and the Suppression of Earth Fault Arcs by the Earthing Coil (Die Begrenzung des Erdschlußstromes und die Unterdrückung des Erdschluß-Lichtbogens durch die Erdschlußspule). *Elektrotechnische Z. (ETZ)* 1919, 40, 5–7. Available online: <https://archive.org/details/elektrotechnische-zeitschrift-40.1919/page/5/mode/1up> (accessed on 17 November 2022).
33. Zamora, I.; Mazon, A.J.; Sagastabeitia, K.J.; Pico, O.; Saenz, J.R. Verifying resonant grounding in distribution systems. *IEEE Comput. Appl. Power* 2002, 15, 45–50. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
34. Druml, G.; Stachel, P.; Gebhard, S.; Leitner, W.; Skrbinek, O.; Achleitner, G.; Schmidt, U.; Schegner, P. New method for measuring the earthfault-distance in compensated and isolated networks. In Proceedings of the 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 21), Online Conference, 20–23 June 2021; Volume 2021, pp. 1416–1419. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
35. Hänninen, S.; Lehtonen, M. *Earth Fault Distance Computation with Fundamental Frequency Signals Based on Measurements in Substation Supply Bay*; VTT Technical Research Centre of Finland: Espoo, Finland, 2002;

Available online: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2002/T2153.pdf> (accessed on 7 October 2019).

36. Loos, M.; Werben, S.; Maun, J.C. Multiple measurements to locate single phase earth fault in compensated network. In Proceedings of the 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, Germany, 14–17 October 2012; pp. 1–6. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
37. Achleitner, G.; Obkircher, C.; Fickert, L.; Sakulin, M.; Raunig, C. An earth fault distance location algorithm in compensated networks with additional estimation of the fault impedance and fault current. In Proceedings of the 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, Parnu, Estonia, 27–29 August 2008; pp. 193–198. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
38. Farughian, A.; Kumpulainen, L.; Kauhaniemi, K. Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks. *Electr. Power Syst. Res.* 2018, *154*, 373–380. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
39. Habib, M.Z.; Hoq, M.T.; Duvnjak Žarković, S.; Taylor, N. Impact of the fault location methods on SAIDI of a resonant-earthed distribution system. In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON), Bangalore, India, 14–16 September 2020; pp. 1–6. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
40. Altonen, J.; Wahlroos, A. Performance of modern fault passage indicator concept in compensated MV-Networks. In Proceedings of the CIRED Workshop, Helsinki, Finland, 14–15 June 2016. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
41. Lehtonen, M.; Siirto, O.; Abdel-Fattah, M.F. Simple fault path indication techniques for earth faults. In Proceedings of the 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), Rakvere, Estonia, 11–13 June 2014; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2014; pp. 371–378. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

42. Farughian, A.; Kumpulainen, L.; Kauhaniemi, K. Earth Fault Location Using Negative Sequence Currents. *Energies* 2019, 12, 3759. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
43. Elsäkerhetsverket. Swedish National Electrical Safety Board's Regulations and General Advice in English. 2008. Available online: <https://www.elsakerhetsverket.se/en/acts-and-regulations/elsak-fs-20081/> (accessed on 18 October 2022).
44. Topolanek, D.; Lehtonen, M.; Adzaman, M.R.; Toman, P. Earth fault location based on evaluation of voltage sag at the secondary side of medium voltage/low voltage transformers. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2015, 9, 2069–2077. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
45. Habib, M.Z.; Abdel-Fattah, M.F.; Taylor, N. A current-based solution for earth-fault location in resonant-earthed medium-voltage distribution systems. In Proceedings of the 15th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2020), Liverpool, UK, 9–12 March 2020; pp. 1–6. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
46. Zheng, Q.; Zhao, Z.; Yihan, Y. Study on method of single-phase-to-earth fault section location in neutral point resonant grounded system. In Proceedings of the 2010 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS), Beijing, China, 20–22 September 2010; pp. 1–4. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
47. Li, T.; Huang, C. New transient fault location method in non-solidly earthed system for distribution network. *CIREN Open Access Proc. J.* 2017, 2017, 1330–1333. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
48. Raunig, C.; Fickert, L.; Obkircher, C.; Achleitner, G. Mobile earth fault localization by tracing current injection. In Proceedings of the 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, Kuressaare, Estonia, 16–18 June 2010; pp. 243–246. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
49. Druml, G.; Skrbinjek, O.; Hipp, W.; Fickert, L.; Schmidt, U.; Schegner, P. First results concerning localisation of earthfaults in compensated 20-kV-networks based on travelling waves. In Proceedings of the 25th International Conference,

Electricity Distribution, Madrid, Spain, 3–6 June 2019. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

50. Leitloff, V.; Pierrat, L.; Feuillet, R. Study of the neutral-to-ground voltage in a compensated power system. *Eur. Trans. Electr. Power* 1994, 4, 145–153. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
51. Wahlroos, A.; Altonen, J. Compensated Networks and Admittance Based Earth-Fault Protection. 2011. Available online: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS757370> (accessed on 26 April 2018).
52. Kulis, I.G.; Marusic, A.; Zutohradac, S. Insufficiency of watt-metric protection in resonant grounded networks. In Proceedings of the 2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam, The Netherlands, 5–8 April 2004; Volume 2, pp. 486–489. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
53. Guldbrand, A.; Samuelsson, O. Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems. In Proceedings of the 2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, Switzerland, 1–5 July 2007; pp. 1129–1134. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]