МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Ефективні методи балансування навантаження електричних мереж
при багатьох споживачах»

Виконала: студентка 2 курсу, групи НФ-63
Коп'якова В.О
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Прикладна фізика
енергетичних систем
Керівник: ст. викладач Віхтинська Т.Г.
Рецензент:

Харків – 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій у фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ

підпис

"____"_____2022 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Коп'якова Валерія Олегівна

1. Тема роботи «Ефективні методи балансування навантаження електричних мереж при багатьох споживачах» керівник роботи: Віхтинська Тетяна Геннадіївна, старший викладач. Затверджено наказом по університету від 03 жовтня 2022 року № 4201–05/1669.

2. Строк подання студентом роботи 25.11.2022

3. Перелік питань, які потрібно вирішити:

1) зробити огляд літератури, аналітичних та комп'ютерних методів визначення ефективності систем електроживлення «розумного» міста або розподілених систем енергопостачання;

2) дати опис основних ідей, що застосовуються для ефективного енергоживлення «розумних» міст та будівель;

3) запропонувати оригінальні методи визначення шляху збалансованого попиту електричної енергії, застосувати ці методи для практичних задач.

4) втілити розроблені алгоритм, та навести приклади розв’язання реальних задач.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми.
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота над літературою та іншими джерелами
4	Збір фактичного матеріалу для створення вступу та першого розділу
5	Підготовка матеріалів для другого розділу
6	Постановка задач, їх розв’язання та представлення результатів. Формування третього розділу
7	Формулювання висновків та формування списку цитованої літератури
8	Підготовка усної доповіді та представлення диплому науковому керівнику
9	Ознайомлення з відгуком, рецензією, внесення остаточних виправленню, підготовка до захисту
10	Представлення роботи на попередньому захисті, остаточне корегування презентації та докладу.
11	Захист дипломної роботи

5.Дата видачі завдання

Студент _____ Валерія КОП’ЯКОВА
підпис

Керівник роботи _____ Тетяна ВІХТИНСЬКА
підпис

РЕФЕРАТ

Валерія Коп’якова «Ефективні методи балансування навантаження електричних мереж при багатьох споживачах»
Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Х.: Харківській національний університет імені В. Н.Каразіна, 2022. – 55 с.

У цій роботі досліджуються ефективні методи балансування навантаження електричних мереж при багатьох споживачах. В роботі обговорюються переваги та недоліки різних аналітичних та комп’ютерних методів визначення ефективності систем електроживлення «розумного» міста або розподілених систем енергопостачання, а також дано ретельний опис основних ідей, що застосовуються для ефективного енергоживлення «розумних» міст та будівель. Основуючись на проведеному аналізі в дипломі запропоновано оригінальні методи визначення шляху збалансованого попиту електричної енергії та розроблені методики застосування цих ідей для вирішення практичних задач. На останньому етапі досліджень розроблені алгоритми були втілені в програмних продуктах, які використовувалися для розв’язанні практичних задач. Отримані рішення описують балансування розподілу енергопостачання при певної кількості споживачів з заданою часовою функцією споживання електричної енергії. Таким чином знайдене рішення може бути використане як інструмент планування у розподільчих системах, що застосовуються до установок із системами вимірювання споживання електроенергії у різні часові інтервали. Подальші дослідження повинні перевірити запропонований метод у реальних умовах, щоб визначити переваги та недоліки реалізації та запропонувати можливі коригування.
КЛЮЧОВІ СЛОВА: БАЛАНСУВАННЯ, ЕНЕРГОЖИВЛЕННЯ, ТРИФАЗНА МЕРЕЖА, МЕТОД «ПЕРЕБОРУ».

ABSTRACT

Valery Kopyakova "Effective methods of load balancing of electrical networks for many consumers"

Master's thesis in applied physics. – Kh.: Kharkiv National University named after V. N. Karazin, 2022. – 55 p.

This paper investigates effective methods of load balancing of electrical networks in many consumers. The work discusses the advantages and disadvantages of various analytical and computer methods for determining the efficiency of the power supply system of a "smart" city or distributed energy supply systems, and also provides a thorough description of the main ideas that are used for the efficient power supply of "smart" cities and buildings. Based on the conducted analysis, the diploma offers original methods of determining the path of balanced demand for electric energy and developed methods of applying these ideas to solve practical problems. At the last stage of the research, the developed algorithms were implemented in software products that were used to solve practical problems. The obtained solutions describe the balancing of the distribution of energy supply for a certain number of consumers with a given time function of electricity consumption. The solution found in this way can be used as a planning tool in distribution systems applied to installations with electricity consumption measurement systems in different time intervals. Further studies should test the proposed method in real-world settings to apply the advantages and disadvantages of the implementation and suggest opportunities for adjustments.

KEY WORDS: BALANCING, ENERGY SUPPLY, THREE-PHASE NETWORK, METHOD OF "SEARCHING".

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ЕФЕКТИВНЕ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ У СМАРТ–МІСТАХ (ОГЛЯД)	9
1.1. Вступ до розділу	9
1.2. Сучасні проблеми урбанізації	11
1.3. Фотовольтаїчна генерація електроенергії	11
1.4. «Розумне» освітлення	13
1.5. Концепції «розумного» паркування	14
1.6. Висновки до розділи	15
2. БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ТА РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ	16
2.1. Основні поняття	16
2.2. Балансування навантаження	21
2.3. Техніка ANN	24
2.4 Результати	30
2.5 . Висновки розділу	34
3. ПРИКЛАДНА ЗАДАЧА БАЛАНСУВАННЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ СИСТЕМИ	35
3.1. Постановка задачі	35
3.2. Приклад розв’язання практичної задачі	40
3.3. Висновки до розділу	43
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45

ВСТУП

Актуальність теми. Швидка цифровізація інформаційних технологій, удосконалення в комп'ютерній індустрії та особливо у взаємозв'язках Інтернету створили величезну кількість можливостей для нової ролі існуючих систем і створення нових систем, кластерів або груп.

У цієї роботі досліджуються ефективні методи балансування навантаження електричних мереж при багатьох споживачах. В роботі обговорюються переваги та недоліки різних аналітичних та комп'ютерних методів визначення ефективності систем електроживлення «розумного» міста або розподілених систем енергопостачання, а також дано ретельний опис основних ідей, що застосовуються для ефективного енергоживлення «розумних» міст та будівель. Основуючись на проведеному аналізі в дипломі запропоновано оригінальні методи визначення шляху збалансованого попиту електричної енергії та розроблені методики застосування цих ідей для вирішення практичних задач. На останньому етапі досліджень розроблені алгоритми були втілені в програмних продуктах, які використовувалися для розв'язанні практичних задач. Отримані рішення описують балансування розподілу енергопостачання при певної кількості споживачів з заданою часовою функцією споживання електричної енергії. Таким чином знайдене рішення може бути використане як інструмент планування у розподільчих системах, що застосовуються до установок із системами вимірювання споживання електроенергії у різні часові інтервали. Подальші дослідження повинні перевірити запропонований метод у реальних умовах, щоб визначити переваги та недоліки реалізації та запропонувати можливі коригування.

Основною метою дипломної роботи є використання оригінальних методів визначення шляху збалансованого попиту електричної енергії та розроблення методики застосування цих ідей для вирішення практичних задач.

Об’єкт дослідження - ефективне постачання електричної енергії.

Предмет дослідження – методи балансування навантаження електричних мереж при багатьох споживачах.

Методи дослідження – математичні методи математичної статистик, які дають змогу дослідити найбільш шляхи споживання енергії.

Наукова новизна одержаних результатів – запропоновано оригінальні методи визначення шляху балансування попиту електричної енергії, розроблені відповідні алгоритми, які застосовано для реальних задач.

Практичне значення отриманих результатів:

– проведено ретельний аналіз аналітичних та комп’ютерних методів визначення ефективності систем електроживлення «розумного» міста або розподілених систем енергопостачання;

– дано аналітичний огляд основних ідей, що застосовуються для ефективного енергоживлення «розумних» міст та будівель;

– запропоновано оригінальні методи визначення шляху збалансованого попиту електричної енергії, застосувати ці методи для практичних задач;

– втілення розроблених алгоритмів при розв’язанні реальних задач.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 52 сторінок, із них основного тексту 46 сторінок, 22 рисунки за текстом, список використаних джерел із 57 найменувань на 7 сторінках.

1. ЕФЕКТИВНЕ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ У СМАРТ–МІСТАХ (ОГЛЯД)

1.1. Вступ до розділу

Швидка цифровізація інформаційних технологій, удосконалення в комп'ютерній індустрії та особливо у взаємозв'язках Інтернету створили величезну кількість можливостей для нової ролі існуючих систем і створення нових систем, кластерів або груп.

Інтернет речей (IoT) тепер об'єднує різні пристрої в домі та дає їм можливість взаємодіяти один з одним, роблячи життя комфортнішим, а їх роботу ефективнішою та зручнішою. Смартфони з постійним підключенням до Інтернету та он-лайн додатками дозволяють обмінюватися всіма видами інформації та послугами, включаючи керування пристроями IoT. Розумний будинок і розумна будівля об'єднують різні робочі функції (освітлення, опалення, керування побутовою технікою тощо), заощаджуючи енергію та роблячи її більш самостійкою.

Smart Health забезпечує швидший, ширший і надійніший доступ до медичних послуг і швидкої першої допомоги для громадян, які її потребують. Розумна роздрібна торгівля надає розширені можливості для малих і середніх підприємств (S/M business), кращий вибір товарів і більш індивідуальну дистрибуцію та постачання продуктів харчування та інших продуктів, а також пропонує більше робочих місць і робочих місць. «Розумна мобільність» або «Розумний транспорт» (громадський і особистий) у межах міста надає точну інформацію про прибуття та наявність громадського транспорту та пропонує допомогу з паркуванням автомобіля. Концепція розумної енергії поєднує централізоване опалення/охолодження, розподіл газу, управління водою з системою управління розподілом електроенергії (DMS), що дозволяє

контролювати та здійснювати операції енергопостачання більш ефективним способом, з набагато вищою надійністю, безпекою постачання, а також з можливістю підключення розподіленої генерації та зниження цін. Існують інші пристрої, машини та інші предмети, які стають «розумними», що робить нашу роботу конкурентоспроможнішою та ефективнішою, а наше життя — приємнішим. Розумне місто фактично об'єднує все це функції, а також надання ряду додаткових функцій, щоб зробити життя в місті набагато кращим [1,2,3,4].

В даний час електрична енергія вважається найбільш зручною для сучасного життя, особливо для розумного міста, оскільки вона є чистою за своєю природою і може бути перетворена в будь-який інший вид енергії з високим рівнем викидів парникових газів (ПГ) або без них. залишків і може забезпечити живлення для широкого спектру машин, пристроїв і обладнання. Крім того, його легко отримати з відновлюваних джерел енергії, що робить його дуже привабливим для боротьби зі змінами клімату та сприяє зменшенню викидів парникових газів у великих населених пунктах і містах. У цьому сенсі сучасна енергосистема є поступова трансформація відповідно до концепції Smart Grids з використанням дерегуляції, організації в мікромережах, розподілена генерація, джерела ВДЕ та передова комунікаційна та інформаційна (Big Data) інфраструктура. Таким чином, у цій статті лише електрична енергія розглядатиметься для постачання Smart Energy.

Міський транспорт вважається одним із основних джерел забруднення повітря через використання великої кількості транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). Щоб зменшити викиди газів, на заміну ДВЗ прийшли електричні або гібридні трансмісії [5]. Міський транспорт буде незабаром базувався в основному на електричній тязі, що живиться від електричної енергії, що зберігається в бортових батареях.

Метою обговорення в цьому розділі є обговорення постачання чистої енергії як частина концепції Smart Energy для нового, майбутнього сектоур електротранспорту в середовищі «Розумного міста» , але беручи до уваги існуючу електророзподільчу мережу, основні транспортні маршрути в межах міста, доступні місця для паркування та інші фактори, які можуть впливати на цю концепцію.

1.2. Сучасні проблеми урбанізації

У 1950 році близько 65% населення в усьому світі проживало в сільських поселеннях і 35% в містах, і ця цифра зміниться8 до 2050 року, де 70% буде міським, а 30% сільським. Майже 6 мільярдів людей житимуть у містах до 2050 року. На рисунку 2.1 роботи [20] показано прогнози міського населення до 2050 року. Ця тенденція до урбанізації присутня в усіх регіонах, хоча й з різними темпами зростання. Порівнюючи прогнозовані темпи зростання міського населення в різних регіонах, стає зрозуміло, що країни з низькими доходами зіткнуться з набагато швидшим зростанням міського населення, ніж країни з високими доходами [16].

1.3. Фотовольтаїчна генерація електроенергії

Щоб увімкнути інтелектуальне постачання електроенергії для споживачів у розумному місті, існуючу структуру енергосистеми (вертикальну організацію мережі передачі та розподілу) необхідно перебудувати в більш сітчастий тип відповідно до концепції дерегуляції та розподіленої генерації. Цій темі присвячено багато наукових праць і книг [6,7]. Постачання чистої енергії можливе лише за умови використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У розумному місті, у густонаселених районах (унизу міста), величезні вітряні

турбіни, гідроелектростанції великої площі, глибокі геотермальні станції або біогазу, виробничі установки непридатні для виробництва електроенергії. З іншого боку, легкі сонячні фотоелектричні (PV) конструкції можна легко встановити на дахах громадських будівель, на вершинах комерційних або спортивних центрів, торгових центрів, промислових цехів, на відкритому просторі на автостоянки тощо.

Фотоелектричні установки на даху можна використовувати як вбудовані або автономні фотоелектричні системи. У першому випадку вся вироблена енергія генерується в існуючу (загальнодоступну) електричну мережу без будь-якого зберігання або внутрішнього використання. Системи поза мережею виробляють енергію для власного споживання та зберігання акумулятора з можливістю або без можливості передачі надлишку електроенергії в державну мережу. Перші системи більш зручні, оскільки вимагають менших інвестицій та витрат на технічне обслуговування. [8]. Детальні дослідження потужностей дахових фотоелектричних електростанцій показали, що від 22% до 56% усієї щорічно споживаної електроенергії можна замінити з таких джерел електроенергії [9,10,11].

Крім того, впровадження цих установок може зменшити втрати електроенергії при передачі, які можуть коливатися від 10% до 30% [9].

Однак проблема полягає в тому, що вироблена енергія має змінну потужність і що вона змінюється протягом доби та за місяцями року, слідуючи змінам сонячного випромінювання. На рис. 3 статті [20] представлено місячне порівняння спожитої електроенергії всіма навантаженнями в місті Суботиця (червоні смуги) з енергією, виробленою фотоелектричними установками на даху (синя смуга). Видно, що в окремі періоди є позитивне сальдо, тобто генерація перевищує споживання. У цьому сенсі деяка ємність для зберігання енергії стабілізує продуктивність і дозволить краще використовувати вироблену

енергію. Але накопичення електроенергії батареями є дорогим та вони мають відносно короткий життєвий цикл.

1.4. «Розумне» освітлення

Посилення екологічного та регуляторного тиску на енергоефективність збільшує вартість енергії. Багато країн намагаються покращити роботу вуличного освітлення та інфраструктуру. Вуличне освітлення споживає аж 40 відсотків споживаної енергії. Застарілі натрієві ліхтарі високого тиску (HPS) та їх допоміжна інфраструктура особливо неефективні та часто працюють до 12 годин на день на повній інтенсивності.

З HPS вуличні ліхтарі часто мають короткий термін служби — близько п’яти років, тому оператори нерідко замінюють приблизно 20 відсотків цих ліхтарів щороку. Це призводить до непередбачуваних витрат на обслуговування та обслуговування. Щоб вирішити ці проблеми, багато операторів переходять на нові енергоефективні вуличні ліхтарі на основі світлодіодів, які дозволяють зменшити споживання енергії в поєднанні з IP-підключенням і датчиками IoT в інфраструктурі освітлення для забезпечення дистанційного керування та моніторингу. Розумне вуличне освітлення вимагає нового, розумні/підключені світильники та блоки живлення (баласти), які необхідно встановити.

Розумне вуличне освітлення потребує встановлення нових інтелектуальних/підключених світильників і блоків живлення (баластів). У співпраці з нашими партнерами HPE Universal IoT Platform здатна керувати інтелектуальним освітлювальним рішенням, яке використовує як лампи HPS, так і нові світлодіодні лампи.

1.5. Концепції «розумного» паркування

Сьогодні розумне паркування включає повний контроль усіх паркувальних місць за допомогою вуличних дисплеїв або додатків для мобільних телефонів про місцезнаходження та кількість вільних місць для паркування. Розширені додатки мають короткострокове бронювання та наведення до вільного паркувального місця з контролем блискавки всередині стоянки. Також моніторинг безпеки і функції пошуку автомобіля доступні [12]. На рис. 5 статті [20] представлена схема однієї з таких систем, представлених на ринку [13].

Перспективи розвитку міського транспорту в майбутньому передбачають, що електричний транспорт буде домінувати [5], оскільки він пропонує численні переваги щодо енергоефективності, екологічних проблем, низького рівня шуму та викидів парникових газів. Для реалізації цієї мети необхідне велике виробництво електромобілів (EV) та будівництво інфраструктури станцій електропостачання. Для побудови інфраструктури встановлено критерії вибору найбільш прийнятних місць для їх розміщення та представлено багато результатів досліджень.

Численні громадські зарядні станції побудовані по всій Європі, США та інших розвинених країнах. Їх карта із зазначенням точного розташування представлена на веб-сайті Plug Share (EV Charging stations map) [14]. Багато з цих місць знаходяться на паркувальних місцях, тому їх роль може стати більш важливою. Але насправді розумна парковка пропонує лише одну послугу – паркомісце. Якщо автостоянка насправді є великим гаражем усередині будівлі з фотоелектричною системою на даху заводу, ніж може з’явитися низка нових можливостей. Подібні випадки можуть бути, якщо є відкрита стоянка з сонцезахисними навісами для автомобілів, покритими фотоелектричними панелями, або відкрита стоянка з сусідньою будівлею з фотоелектричною установкою на даху або будь-який інший подібний випадок. У цих випадках в

одному місці будуть фактично генеруючі установки електроенергії та велика кількість невеликих накопичувачів енергії.

Це дасть можливість активізувати енергетику Smart Building і Smart Parking – бути не тільки споживачами енергії, але й виробниками, а також здійснювати її обмін, тобто стати більш енергонезалежними та активними.

На рис. 6 статті [20] показано активну енергетичну роль Smart Parking і Smart Building. Можна побачити, що на паркувальному місці буде можливість заряджати батареї електромобілів, тобто купувати електроенергію з мережі (gridto- vehicle energy flow, G2V), або розряджати її, тобто продавати енергію в мережу (потік енергії від автомобіля до мережі, V2G) або обмінюватися нею з іншими EV, тобто купувати/продавати її іншим EV (потік енергії від автомобіля до автомобіля, V2V). Подібні обміни можна здійснити з енергетичною службою будівлі, тому ми можемо мати від будівлі до автомобіля (Bd2V) або потік енергії від автомобіля до будівлі (V2Bd). Крім того, він пропонує можливості для передачі енергії від будівлі до мережі (Bd2G), тобто для постачання надмірної енергії від фотоелектричної установки на даху та накопичувачів електромобілів до мережі, або передачі енергії від будівлі до будівлі (Bd2Bd) і, таким чином, невеликі мікромережі по сусідству.

1.6. Висновки до розділу

«Розумне місто» пропонує нові можливості для більш ефективного енергопостачання, особливо якщо фотоелектричні установки на даху для виробництва електроенергії та електромобілі як накопичувачі енергії включені до схеми обміну енергією. Проблема може виникнути через сонячну змінну природу та обмежену тривалість використання стоянки електромобілями. Цю потребу потрібно вирішувати за допомогою більш складних алгоритмів оптимізації та широкого використання IT-технологій.

2. БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ТА РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ

2.1. Основні поняття

Концепція розподілу електроенергії вважається пунктом взаємозв'язку енергокомпанії та її остаточним покупцем. Ці концепції мають неврівноважені живильники через різноманіття дії відвідувачів. З'являються певні ґрунтовні завдання; неврівноважена робота підвищує робочі витрати і капіталовкладення в концепцію. У концепціях радіального розподілу найрезультативнішим способом вважається перехід навантажень серед трьома фазами з метою балансування фаз. Це робиться вручну і підпорядковується рівнянню обмеження потоку навантаження, потужності та напруги. Останнім часом завдяки інтелектуальним мережам та автоматизованим мережам динамічна фазова балансування привернула більше уваги, тим самим автоматично переключаючи навантаження між трьома фазами дисбаланс що перевищує припустимі межі за допомогою селектора/регулятора фази з дистанційним керуванням. Автоматична ре конфігурація фідера та врівноваження фаз ліквідує припинення обслуговування, покращує відновлення енергії та мінімізацію втрат. У цій статті наведено кейс із Ірбідської ділянки електроенергетики, представлена компанія (IDECO). найкраща ре конфігурація симетрії фаз за допомогою трьох прийомів: нейронна мережа прямого зворотного поширення (FFBPNN), нейронна мережа радіальної базової функції (RBFNN), і гібрид передбачається перевіряти чергу перемикання для кожного приєднаного навантаження. Звіряння показує, що змішана техніка завдає кращої продуктивності. Ця робота унаслідується із застосуванням MATLAB та мови програмування C.

Введення системи розподілу електроенергії зазвичай незбалансовані через постійну зміну профілю завантаження клієнта протягом дня. Коли три фази не є

збалансованими, збільшується ризик перевантаження мережевого обладнання та втрат потужності. З часом це впливає на стабільність системи, зменшується якість постачання та виростає вартість електроенергії [21]. З іншого сторони, балансування навантаження підіймає надійність та безпеку електричної мережі. Балансування навантаження також зменшує системні втрати (знімає навантаження на трансформатор [22,23]).

Розбалансовані трифазні фідери можна переналагоджувати шляхом реалізації деяких методів збалансування навантаження.

Дані від інтелектуальних лічильників (на початку кожного фідеру маленької напруги сторони клієнта надсилаються безпосередньо на пульт дистанційного керування для розрахунку утрат на фідері). Втрати в фідері це різниця між фідером і сумою споживання клієнтів. Далі контролер дає команду на одностороннє перемикання пристрій для виконання дій (якщо потребується) для перемикання між фазами годування клієнтів. Дані, що надсилаються на контролер, можна класифікувати як фіксовані дані та дані, що змінюються.

Фіксовані дані будуть введені як дані щодо топології мережі, це:

1. довжина,

2.розміри,

3.конфігурація кабелю,

4.дані про клієнтів, такі як номери клієнтів у кожному вузол з'єднання.

А змінні дані – це дані, які надходять від основного розумного лічильника фіксується на початку низьковольтного фідера, це:

1. потужність

2. енергія

За також дані надходить від інтелектуальних лічильників (закріплених на стороні споживача, що містить потужність та енергію споживання

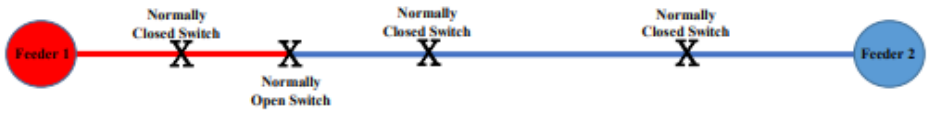


Рис. 2.1 Балансування навантаження перед ре конфігурацією фідера

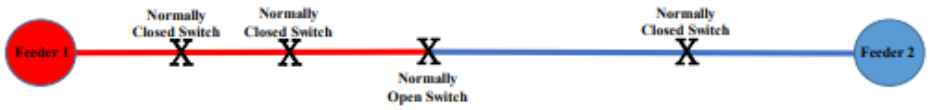


Рис. 2.2 Балансування навантаження після ре конфігурації фідера

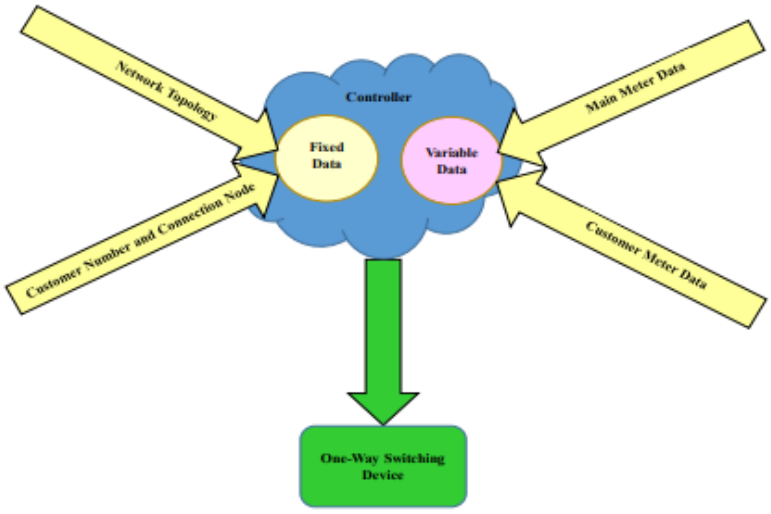


Рис. 2.3 Схематична діаграма для даних, що надсилаються до контролера.

Цей механізм працює за допомогою перемикача фаз перед лічильником електроенергії у клієнта та перемикаючи клієнтів між собою, три фази на одному фідері для підтримки постійного балансу фаз. Коли три фази підключені до вхідної сторони перемикача фаз, повинен бути лише один перемикач, закритий як вихід, тоді як інші дві фази повинні залишатися відкритими, як показано на рисунку 2.4. Ре конфігурація фідера змінює його топологію шляхом переміщення частин фідера до сусіднього, змінюючи стан перемикачів так, щоб навантаження перемикалися від однієї годівниці до іншої, щоб зменшити завантаження перевантаженої годівниці до мало завантаженої один [24,25]. Зазвичай зміна конфігурації фідера зміщує навантаження з сильно завантаженого фідера до іншої слабо завантаженої годівниці. Практично, навантаження виконують електророзподільні підприємства балансування за допомогою ручної методики проб і помилок, що займає багато часу, коштує і є

не гарантує рівність фазового навантаження. Автоматизація балансування фаз стає більш реалістичною, витривалий, спритний. Це реалізується через силову електроніку, сучасний зв'язок техніки та штучний інтелект. Різні типи підходів на основі нейронної мережі представлені в цій роботі для керування виходом селектора перемикача для перемикання клієнтів між ними фази. Поряд з низьковольтними розподільними фідерами, декілька звичайно відкритих

і нормально закриті вимикачі розподіляються, щоб дозволити передачу струмів навантаження між ними фідері [26]

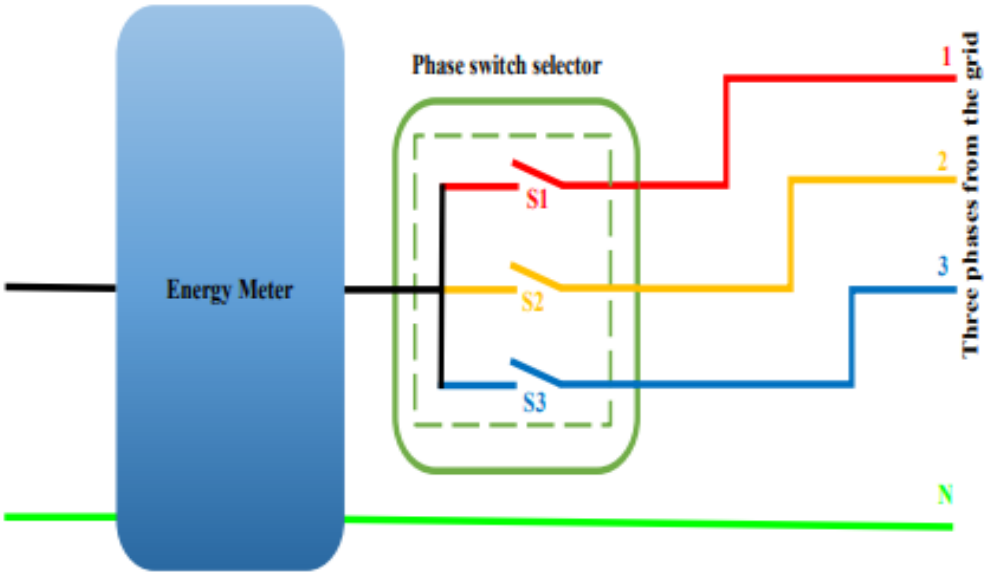


Рис. 2.4. Перемикач фаз.

Розподільчі системи працюють в обмежених умовах, для забезпечення постійного постачання користувачам якості. Розподільні Фідери відрізняються різними категоріями навантаження. Важливо змінюючи конфігурацію мережі, змінювати розклад навантаження для ефективної роботи системи [27]. Ре конфігурація фідера міняє топологію розподільчої системи шляхом зміни відкритого та закритого стану перемикачів, тоді як заміна фаз міняє клієнта з однієї фази до іншої. При аналізуванні балансування навантаження розуміє, яке з навантажень підлягає підключенню до іншої фази.

Тобто у розподільчій системі зберігає майже однакові струми навантаження для трьох фаз. Саме тоді вважається що навантаження розподілене рівномірно на усіх трьох фазах. Це означає що кожна фаза бере третю частину від загального навантаження.

Тому проблемою яка може виникнути, буде пошук відповідних трьох навантажень серед окремих. Щоб зменшити втрати при реконфігурації та при балансуванні навантаження використовують декілька методів, серед яких:

1) евристичні або метаевристичні підходи [28–30];
2) математичне програмування[31];
3) інтелектуальні алгоритми[32,33];

При використанні евристчних методів будуть зменшені втрати що використовуються для обчислення.

4) Реконфігурація мережі з генераторами оптимального розподілу

розташування, визначення розмірів і розміщення перемикачів для підвищення надійності та мінімізації втрат[34];

Зменшення втрат шляхом переналаштування та комутаційних модифікацій схоже на закриття розмикання або закриття секційних перемикачів розподільних фідерів;

5) Установка [35,36] показує використання техніки зміни потоку навантаження перед електрикою при балансуванні трьох фаз.
6) Нелінійна задача оптимізації з цільовою функцією представлена у вигляді оцінки балансування навантаження за допомогою розрахунку індексу балансування [37].
7) Зменшення дисбалансу фідера за допомогою нечіткої логіки [38,39].
8) Приклад оптимізації мурашиної колонії як різні методи для підтримки балансу навантаження [40].
9) опорні векторні машини [41,42]
10) дискретний пасивний компенсатор [43].
11) Нейронна мережа (RBFNN) [44].

12) Нейронна мережа прямого зв’язку зі зворотним розповсюдженням (FFBPNN) [45].

2.2. Балансування навантаження

Оператори розподільчих мереж наштовхуються на постійний тиск щодо покращення якості постачання споживачам і зменшення операційних втрат. Незбалансоване завантаження розподільних фідерів є значним, воно впливає на загальні втрати в мережах низької напруги. Коефіцієнт асиметрії високий, це коли загальне навантаження низьке, а асиметрія значно менша під час пікового навантаження. Тобто, система активно намагається симетризувати навантаження під в той період коли низьке навантаження і мінімальний вплив на загальні втрати. Таким чином, неврівноважене навантаження розподілу фідера з трьома фазами та те як струми дисбалансу впливають на загальні втрати є важливою темою для розмірковування.

Перетворення електромережі постачає кращу продуктивність і можливість збільшення для клієнтів, спільнот і компаній. Система що показана у цій роботі є початком вдосконаленої інфраструктури вимірювань, яка об’єднує розумні лічильники, програмне забезпечення, центри обробки даних і комунікаційні мережі. Електричні компанії покращують свої послуги та роботу з клієнтами.

Єдиною проблемою що виникає є у визначення перемикачів, які потрібно відкрити або закрити для балансування навантаження між фідерами. При використанні такого балансування напруги треба притримуватись деяких обмежень:

1) теплове обмеження
2) обмеження надійності
3) обмеження пропускної здатності розподільних ліній
4) трансформатори для досягнення рівного фазового навантаження.

Навантаження не є однаковим протягом доби. Користувачі безперервно міняються між фазами, щоб фідеру та трансформатору збалансувати навантаження. В той момент коли лічильники передають данні на віддалений сервер, він шукає методи оптимізації. Все це робиться для уникнення припинення постачання.

Для отримання найкращої фази віддалений сервер збирає данні інтелектуальних лічильників, обчислює втрати у поточному часі, змінює навантаження, щоб знайти найкращу фазу та передає цю пропозицію до селектору. Сам селектор у цей час виконує таку роботу: він приймає трифазний вхід, кожна фаза приєднана до вимикача. Два вимикачі будуть відкритими, а третій закритим.

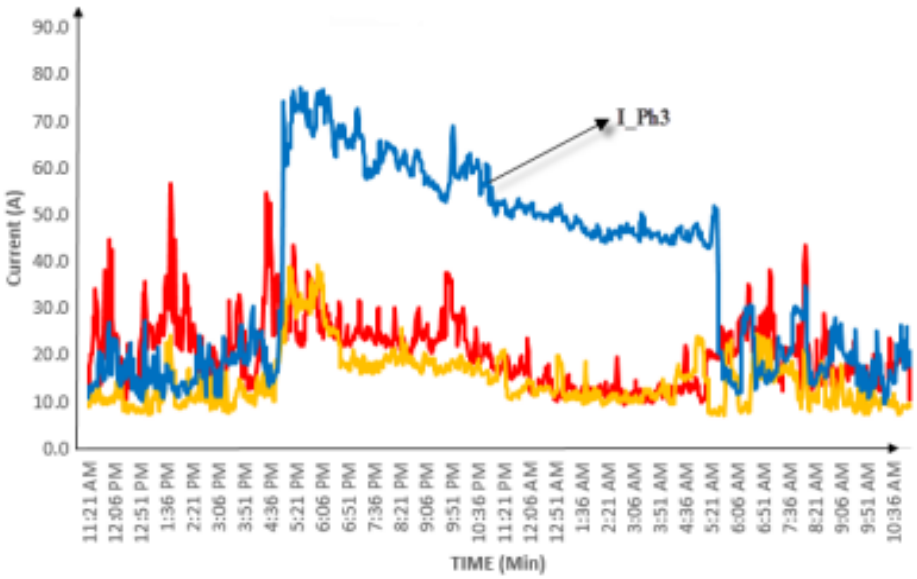


Рис. 2.5 Несиметричні трифазні струми навантаження.

Саме так повинно бути коли від сервера буде надходити наказ про зміну фази користувача. Це все робиться дуже швидко, саме тому користувачі нічого не помітять.

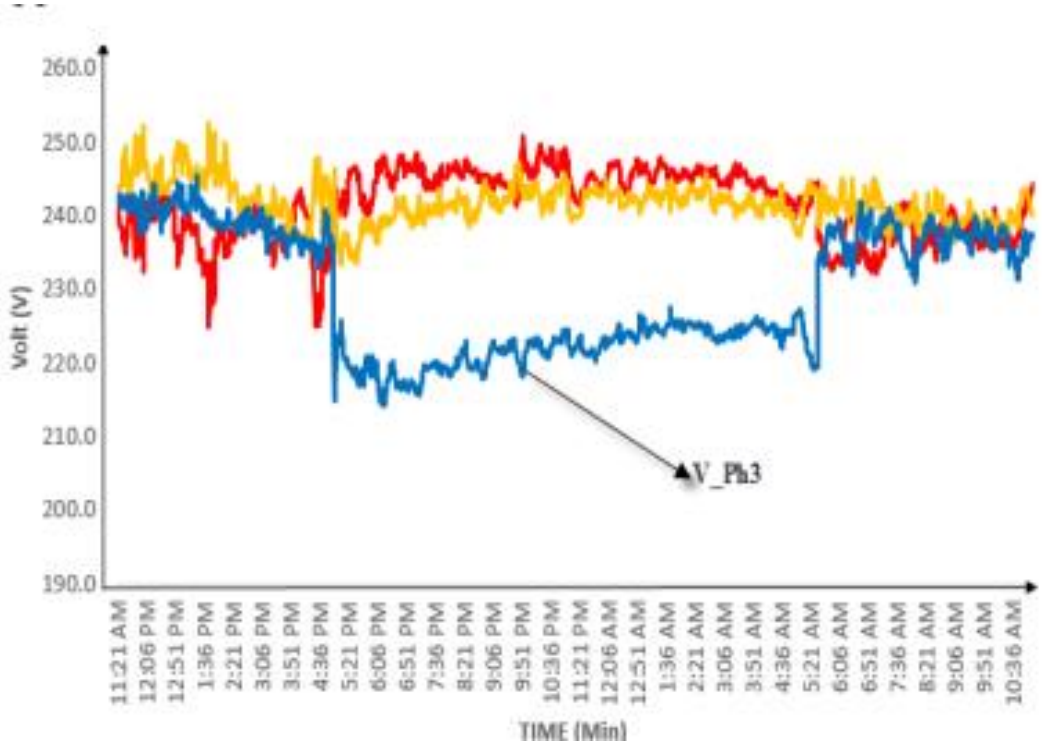


Рис. 2.6 Несиметричні трифазні напруги навантаження.

2.3. Техніка ANN

Метод RBFNN — це метод ANN, який був сформульований у 1988 році Брумхедом і Лоу. Він залежить від лінійної функції активації, вона є сталою на всіх рівнях. На відміну від радіальної базисної функції активації Гауса, вона зберігається в прихованому шарі, як показано на рисунку 2.9. Але існує три основні параметри: центр (його визначають за допомогою методів кластеризації), передавальна функція та відстань (вимірюється між входом і центром). На шаблоні навчання визначається кількість нейронів у шарах, в той же час на основі не лінійності системи визначається кількість нейронів у прихованому шарі.

Представляємо математичну модель RBFNN [48].

$$f(I) = \psi\left(\frac{\| I - c_i \|}{r_i^2}\right)^2 \quad (1)$$

де I — вхідні вектори, f(I) — вихід і-го нейрона в прихованому шарі, r_i — радіус і-го нейрона в прихованому шарі, c_i —центр і-го нейрона в прихованому шарі, Ψ – радіальна базисна функція, q – кількість входів у процесі навчання,

$\| I - c_i \|$ – відстань між вхідними векторами та центром c_i в евклідовому просторі.

Для розрахунку розташування центру використовується техніка кластеризації, вона визначається рівнянням (2.2) [49].

$$\| I - c_i \| = \sqrt{(I_1 - c_{i1})^2 + (I_2 - c_{i2})^2 + ... + (I_q - c_{in_i})^2} \quad (2)$$

Задано ширину G_{tr} базисної функції (σ) і вагу вихідного шару W рівняннями (2.3) і 2. (4) відповідно [49].

$$G_{tr}(\| I_q - c_i \|^2) = e^{(\frac{-N_h}{d\max}\|I_q - c_i\|^2)} \quad (3)$$

$$W = G_{tr}^{+} * Y_{tr} \quad (4)$$

Вихід Y RBFNN можна отримати за допомогою рівняння (5) [49].

$$Y = W^T * G_{tst}^T \tag{5}$$

G_{tst} задано у рівнянні (6), tst призначене для отримання задовільного результату на вхідному векторі. На рисунку 10 показана основна процедура навчання RBFNN. Спочатку збирають дані, після цього вибирають вхідні дані та оптимальну кількість нейронів у трьох шарах з відповідною вагою та функцією активації. Після цього розпочинається навчання мережі та обчислення похибки [49].

$$G_{tst}(\| I_{tst} - c_i \|^2) = e^{(-\frac{\|I_{tst} - c_i\|^2}{2\sigma^2})} \tag{6}$$

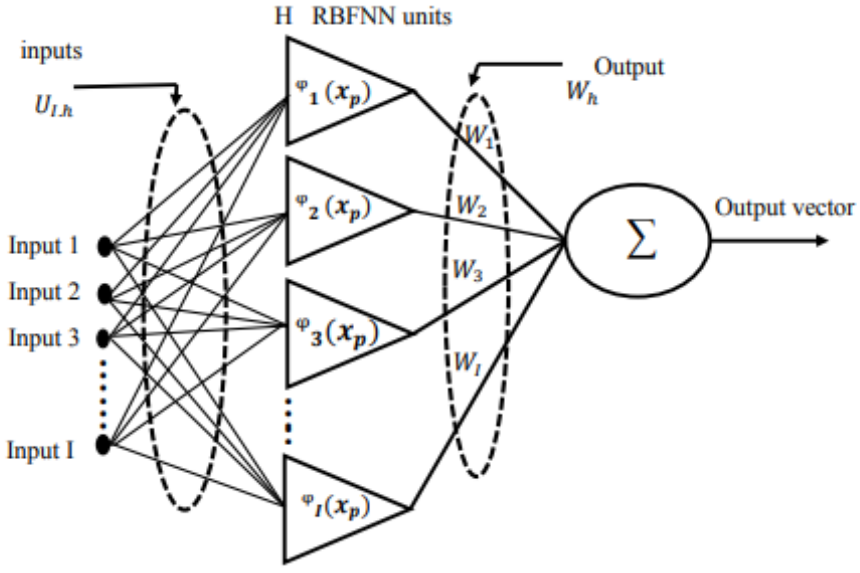


Рис. 2.9 Архітектура RBFNN [50].

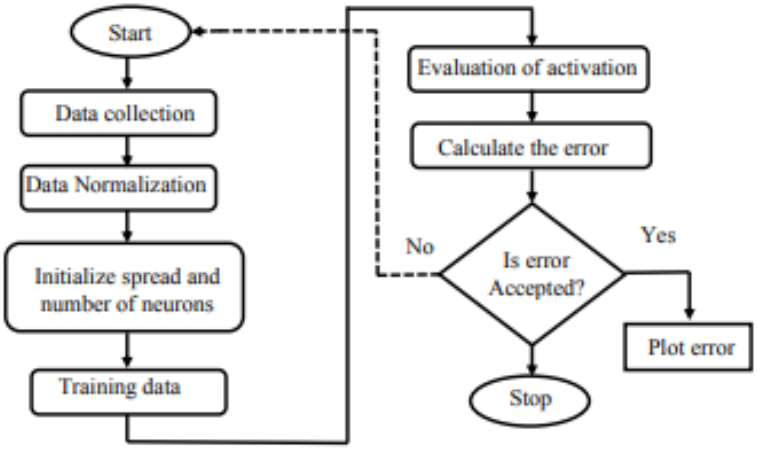


Рис. 2.10. Блок-схема RBFNN [51].

Тут найголовніше мінімізувати помилку всієї мережі, зменшенням помилки кожного нейрона на виході. ANN виявляє як зіставити довільний вхід із виходом шляхом оптимізації ваг. У такої техніки багато переваг

1) точність,
2) зменшення часу навчання,
3) підвищення швидкості обробки,
4) оптимізація функції вартості та покращення середньої абсолютної відсоткової помилки (MAP) [51].

За допомогою цієї техніки описують алгоритм зворотнього поширення це як показано на рисунку 2.11; спочатку створюється мережа, після цього вона навчається, тобто вона надає вхідні дані які пізніше дають інноваційний результат. Коли вхідні які змінюють вихід, також після цього змінюють зворотне розповсюдження, разом із помилкою яка оцінюється з вхідними даними, тобто застосовують техніку прямого розповсюдження. Вага регулюється, і помилка зменшується, відрегулювавши вагову функцію. Назва зворотного поширення походить від послідовності процесу [52]. Тому що

спочатку він йде звичайно вхід-вихід, але після цього в зворотньому напрямку, вихід-вхід це показано на рисунку 2.12. Найкращі результати отримано шляхом зменшення помилки і чим частіше повторювати це, тим кращі результати. Це показано на малюнку 2.13, спочатку отримати нове спостереження x = [x_1 . . . x_d] і ціль y^*, тоді в кожному шарі 1 . . . L подавати вперед для кожної одиниці g_i, потім обчислити g_i на основі одиниць f_k з попереднього шару, це відображено в рівнянні (7).

$$g_i = \sigma\left(u_{j0} + \sum u_{jk} f_k\right) \tag{7}$$

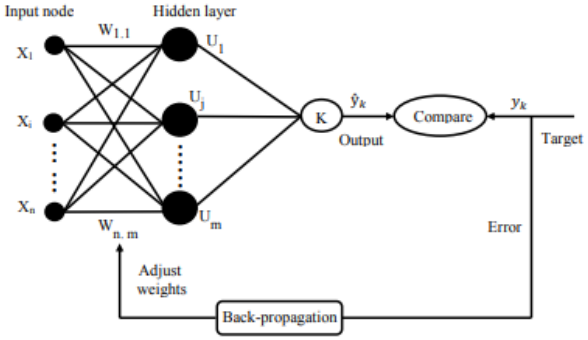


Рис. 2.11 Алгоритм навчання FFBPNN з трирівневою архітектурою [53].

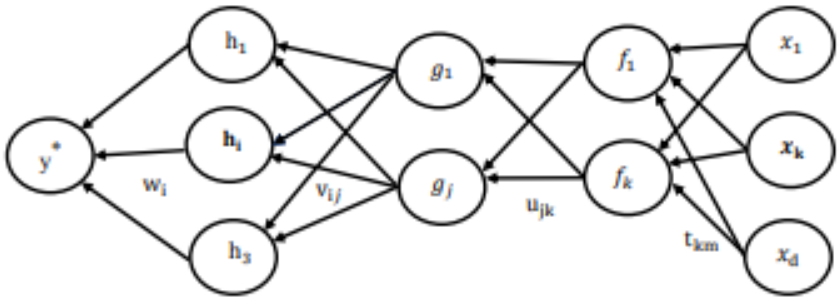


Рис. 2.12 Архітектура зворотного поширення [53].

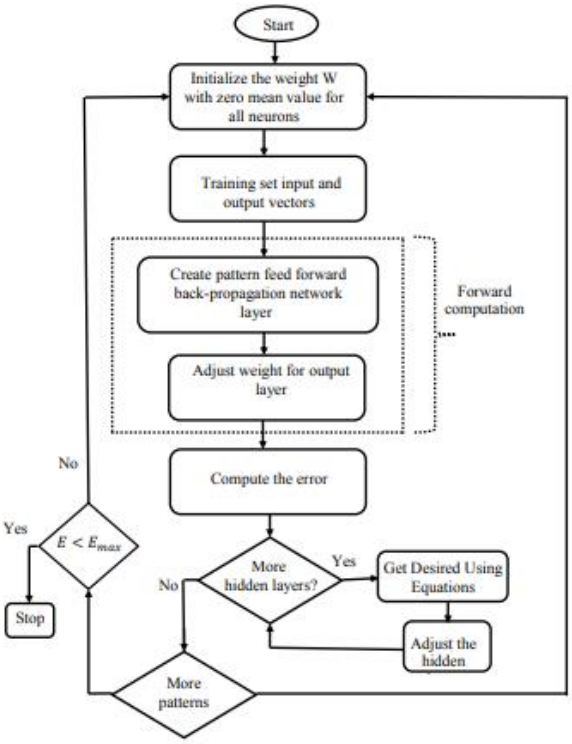


Рис. 2.13 Блок-схема алгоритму FFBPNN [54].

Отримавши ціль y^2 ми обчислюємо похибку $(y - y^*)$.

Для кожної g_i помилка можна обчислити як на g_i, так і на u_{jk}. u_{jk} впливає на g_i за допомогою рівнянь (2.8) і (2.9), створюється синтетична навчальна модель для всіх прихованих одиниць у мережі, а помилки поширюються шляхом обчислення похідної помилки відносно одиниці g у мережі. Самі одиниці g впливають на h і оновлення ваги v_{ij}. Вузли є сигмоїдами, і функція масштабування $\sigma'(h_i)$ стверджує, що H було близько нуля або одиниці, тоді будь-які зміни, внесені до G, не впливають. H визначає, чи є G високим або низьким. Крім того, ваги f_k, які з'єднують G з вузлами, є вищими або нижчими, як показано в рівнянні (2.9). Похідна вказує на те, що міцність вища або нижча. У цьому логістичному процесі, кожній ітерації, ця сила і вага оновлюється, як показано в рівнянні (2.10) [53].

$$\frac{\partial E}{\partial g_i} = \sum \sigma'(h_i) v_{ij} \frac{\partial E}{\partial h_i} \ , \tag{8}$$

$$\frac{\partial E}{\partial u_{jk}} = \frac{\partial E}{\partial g_i} \sigma' g_j f_k \quad , \tag{9}$$

$$u_{jk} \leftarrow u_{jk} - \eta \frac{\partial E}{\partial u_{jk}} \tag{10}$$

Рівняння (11) показує нам різницю між y та y*.

Рівняння (12) показує нам похідну помилки h_i у останніх прихованих шарах.

Рівняння (13) показує нам значення похідних похибки до прихованих шарів.

Похідна помилки g не змінилася. Це показано в рівняннях (14)–(16) відповідно. Це гніздо можна обробляти багато шарів. рівняння (9)–(16) доказують рівняння (8), а також оптимізують похибку щодо всіх параметрів [54].

$$E = \frac{1}{2}(y - y*)^2 \ , \tag{11}$$

$$\frac{\partial E}{\partial h_i} = (y - y*) y (1 - y) \omega_i \ , \tag{12}$$

$$\frac{\partial E}{\partial g_i} = (y - y*) \frac{\partial y}{\partial g_i} \ , \tag{13}$$

$$\frac{\partial E}{\partial g_i} = (y - y*) y (1 - y) \sum_i \omega_i \frac{\partial h_i}{\partial g_i} \ , \tag{14}$$

$$\frac{\partial E}{\partial g_i} = (y - y^*)y(1-y)\sum_i \omega_i h_i (1-h_i)\upsilon_{ij}\,, \tag{15}$$

$$\frac{\partial E}{\partial g_i} = \sum_i h_i (1-h_i)\upsilon_{ij}\frac{\partial E}{\partial h_i} \tag{16}$$

2.4 Результати

Оцінено ефективність та прийнято:

1)середню абсолютну відсоткову похибку (MAPE),

2)середні квадрати помилок (MSE),

3)корінь означає квадрат помилки (RMSE).

Де

• MAPE: показує відхилення прогнозованих помилок, які показують, наскільки прогнозовані точки близькі до цільової лінії, представленої рівнянням (17).

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}\left(y_i - \hat{y}_i \right)^2 \tag{17}$$

• MSE - середнє значення величини прогнозованих помилок, представлене рівнянням (2.18).

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}\left| y_i - \hat{y}_i \right| \tag{18}$$

RMSE: показує відхилення прогнозованих помилок, які показують, наскільки прогнозовані точки близькі до цільової лінії, представленої рівнянням (2.19).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n \left(y_i - \hat{y}_i \right)^2}{n}} \tag{19}$$

де n – кількість спостережень, i = 1, 2, 3, . . . , n.y_i є виміряне значення, і $\hat{y}_i$ – прогнозоване значення.

Також для більш точніших оцінок можна застосовувати цю функцію в іншому вигляді

$$RMSE_2 = \sqrt{\frac{\sum_i^n \left(y_i - \hat{y}_i \right)^2}{n(n+1)}} \tag{20}$$

Моделювання виконується на Intel Core i7-8750H CPU, 2.20 GHz, 64.0 GB RAM комп'ютер. ANN техніка реалізується за допомогою Mathworks/MATLAB. Інший ANN використовують, вибір кількості прихованих шарів і кількості нейронів. Це призводить до швидкого навчання, дозволяє зменшенти обсяг пам’яті та прийняти глобальне узагальнення. Для вирішення проблеми балансування навантаження використовується ANN техніка. Використовуються як реальні дані IDECO близько 10 000 зразків. Кожен з них вимірює струм для 27 різних навантажень (будинків). Це дозволяє керувати послідовністю перемикання кожного навантаження, щоб збалансувати три фази. Ось так розподіляють записані дані: набір для навчання 75%, набір перевірки 10% і набір тестування 15%. ANN входами цє незбалансовані 27 струмів навантаження, а послідовні перемикання кожного навантаження є виходами. Вихід кожного навантаження знаходиться в діапазоні (1, 2, 3). Номер фази значить що для цього навантаження перемикач буде відкритий або закритий. Реалізовуючи евристичну техніку ми отримуємо збалансоване вхідне

навантаження, яке вікористовуємо для навчання, перевірки ANN, також для навчання. Matlab/Mathworks Команда (newff) використовується для реалізації FFBPNN для всього фідера з матрицями входу та виходу (10 000 × 27) та (3 × 10 000), відповідно. Найкращу ефективність перевірки для FFBPNN показано на рисунку 2.14.

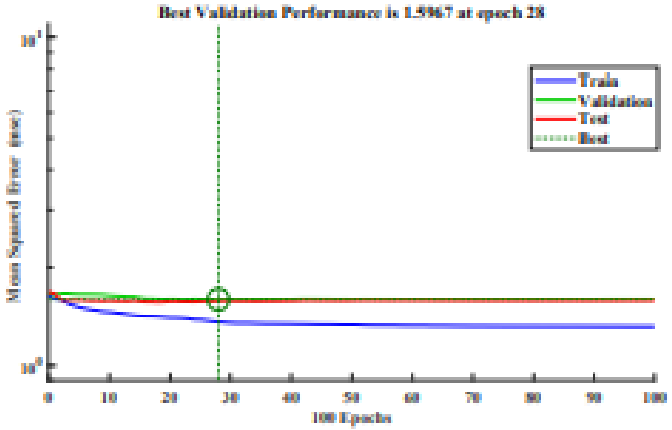


Рис. 2.14 Продуктивність навчання FFBPNN, епоха = 100 і досягнута максимальна епоха.

На рисунках 2.15–2.17 показано трифазні струми через Iideal для трьох методів. Таким чином, гібридна методика має найкращу ефективність у дослідженнях балансування фаз. Він практичний, гнучкий і рекомендований IDECO.

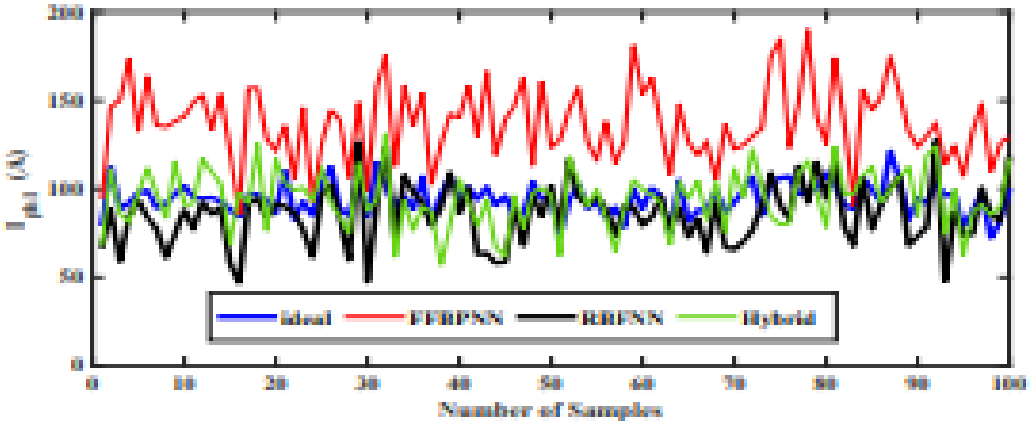


Рис. 2.15 I_{ph1} через I_{ideal} для різних зразків і технік

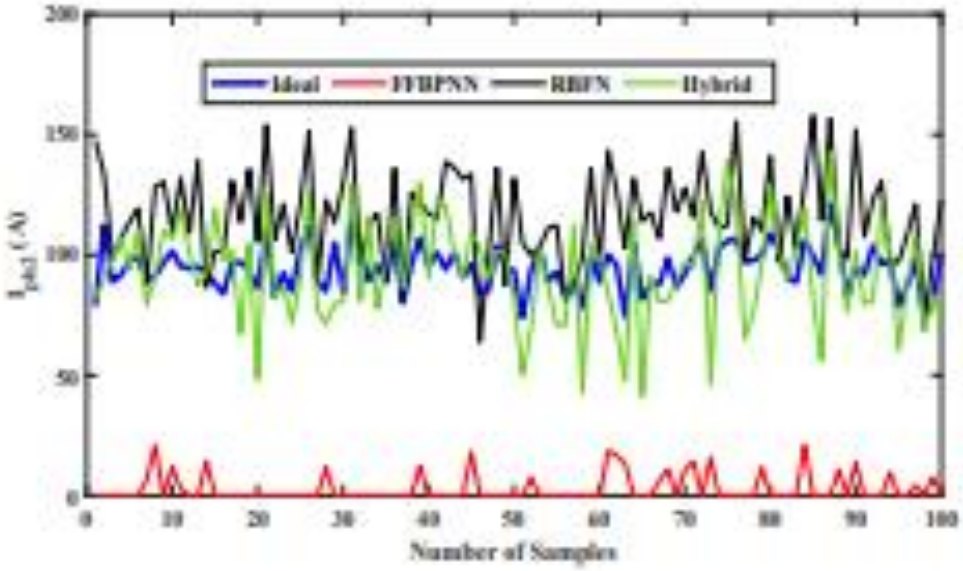


Рис. 2.16 I_{ph1} через I_{ideal} для різних зразків і технік

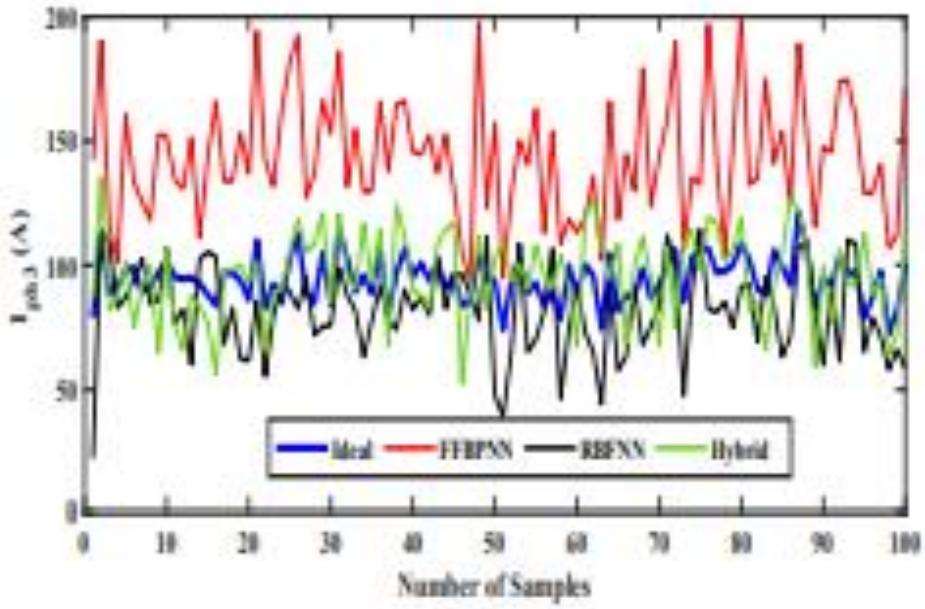


Рис. 2.17 I_{ph3} через I_{ideal} для різних зразків і технік

2.5 . Висновки підрозділу

У цій роботі представлено рішення балансування навантаження на основі MATLAB для ANN методів. Використані змодельовані данні які були успішно перевірені та підтверджені, показують відхилення від бажаного ідеального струму використовуючи метод FFBPNN, використання цієї методики є найгіршим серед усіх запропонованих. Але гібридна методика дасть кращі результати проблем балансування навантаження, ніж використання окремих методів FFBPNN або RBFNN. IDECO рекомендує використовувати саме її в дослідженнях балансування навантаження, тому що у нього кращу конвергенцію, швидше навчання та краща точність класифікації за допомогою дискретного набору даних. Також клієнти та комунальні підприємства мають багато переваг при використанні трифазного балансування.

3. ПРИКЛАДНА ЗАДАЧА БАЛАНСУВАННЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ СИСТЕМИ

У цьому розділі буде розглянута конкретна задача про балансування системи енергопостачання. Ця задача є основною для цього диплома. Тому вона буде ретельно розглянута, будуть наведені основні формули та запропоновано алгоритм пошуку найбільш ефективної системи балансування. Зокрема, буде запропоновано алгоритм пошуку методом перебору. У цього методу є безумовна перевага – його простота. Але час розрахунків може виявитися занадто великим. У роботі буде з'ясовано, що для не дуже великої кількості споживачів (менш 100), такий алгоритм не збільшує суттєво час розрахунків, і, навіть , може буде застосований до розрахунків у реальному часі.

3.1. Постановка задачі

Дисбаланс енергетичного навантаження, створений різницею та зміною з часом потреби споживачів остається однією з суттєвих проблем функціювання систем енергопостачання та розподілення. Розглянемо у дипломі задачу балансування навантажень у трьох фазній системі розподілу.

За постановкою задачі припускаємо, що кожен з споживачів в системі розподілу електричної енергії підключається тільки до однієї фази системи живлення. Нехай кожне навантаження клієнта має певну, задану у часі, функцію (попит), яке залежить тільки від особливостей клієнта. Рис. 3.1. демонструє показано підключення чотирьох клієнті, j - фази.

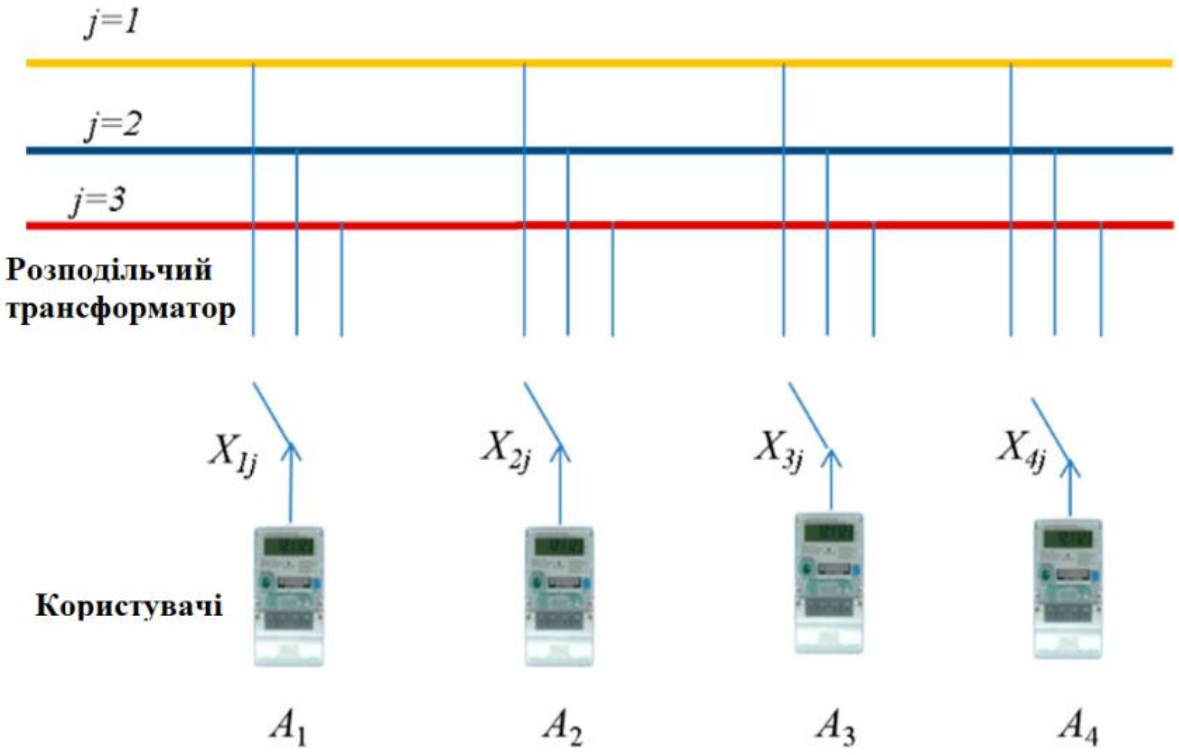


Рис.3.1. Приклад підключення чотирьох клієнтів для фаз 1, 2 і 3. Числа X_{ij} є так званими «перемикачами», які враховують факт для підключення кожного користувача лише до однієї фази.

Припустимо, що в даному вузлі до трифазної мережі довільно підключено N споживачів, тоді загальна споживана потужність дорівнюватиме

$$P = \sum_{n=1}^{N} P_n \tag{21}$$

Тут P_n споживана потужність n-им користувачем. Передбачається, що кожен споживач підключений тільки до однієї з фаз. Інформація про номер

фази, до якої підключений конкретний споживач, визначається змінною X_n^k. Ця змінна є цілим числом і дорівнює одиниці

$$X_n^k = 1, \tag{22}$$

якщо відповідний *n*-й споживач підключений до відповідної *k*-фази, а за відсутності підключення дорівнює нулю:

$$X_n^k = 0. \tag{23}$$

Наприклад, якщо десятий споживач підключено по другої фази, то

$$X_{10}^1 = 0 \qquad X_{10}^2 = 1 \qquad X_{10}^3 = 0.$$

З цього визначення X_n^k очевидно випливають обмеження, накладені на цю змінну, зокрема:

$$X_n^1 + X_n^2 + X_n^3 = 1, \qquad \text{для будь-якого } n = 1..N. \tag{24}$$

Наприклад,

$$X_7^1 + X_7^2 + X_7^3 = 1$$

Використовуючи значення P_n ми можемо записати потужність, споживану кожною з фаз:

$$P^{(k)} = \sum_{n=1}^{N} X_n^{(k)} P_n \tag{25}$$

Наприклад, якщо в нас два користувача, перший з яких підключено до 3 фази, а другий – до першої, то

$$X_1^1 = 0 \qquad X_1^2 = 1 \qquad X_1^3 = 0$$

$$X_2^1 = 0 \qquad X_2^2 = 0 \qquad X_2^3 = 1$$

Якщо в прикладі додати ще споживачів: третього приєднати до другої фази, четвертого – до першої, а п’ятого – до третьої, то

$$X_3^1 = 0 \qquad X_3^2 = 1 \qquad X_3^3 = 0$$

$$X_4^1 = 1 \qquad X_4^2 = 0 \qquad X_4^3 = 0$$

$$X_5^1 = 0 \qquad X_5^2 = 0 \qquad X_5^3 = 1$$

У цьому прикладі можна знайти потужність, споживану кожній з фаз:

$$P^{(1)} = \sum_{n=1}^{5} X_n^{(1)} P_n = X_1^{(1)} P_1 + X_2^{(1)} P_2 + X_2^{(1)} P_3 + X_2^{(1)} P_4 + X_2^{(1)} P_5 =$$

$$= 0 \cdot P_1 + 0 \cdot P_2 + 0 \cdot P_3 + 1 \cdot P_4 + 0 \cdot P_5 = P_4$$

$$P^{(2)} = \sum_{n=1}^{5} X_n^{(2)} P_n = X_1^{(2)} P_1 + X_2^{(2)} P_2 + X_2^{(2)} P_3 + X_2^{(2)} P_4 + X_2^{(2)} P_5 =$$

$$= 1 \cdot P_1 + 0 \cdot P_2 + 1 \cdot P_3 + 0 \cdot P_4 + 0 \cdot P_5 = P_1 + P_3$$

$$P^{(1)} = \sum_{n=1}^{5} X_n^{(3)} P_n = X_1^{(3)} P_1 + X_2^{(3)} P_2 + X_2^{(3)} P_3 + X_2^{(3)} P_4 + X_2^{(3)} P_5 =$$

$$= 0 \cdot P_1 + 1 \cdot P_2 + 0 \cdot P_3 + 0 \cdot P_4 + 1 \cdot P_5 = P_2 + P_5$$

І тепер можна довести , що вся споживана енергія з трьох фах розподілилася між п’ятьма споживачами:

$$P^{(1)} + P^{(2)} + P^{(3)} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = P$$

Тобто, сума потужностей, споживаних кожною з фаз, закономірно виявляється рівною загальній споживаній потужності:

$$P^{(1)} + P^{(2)} + P^{(3)} = \sum_{k=1,2,3} \sum_{n=1}^{N} X_n^{(k)} P_n = \sum_{n=1}^{N} P_n \sum_{k=1,2,3} X_n^{(k)} = \sum_{n=1}^{N} P_n = P \qquad (26)$$

Основним завданням балансування блоку живлення є знаходження таких значень станів вимикачів, при яких споживана потужність в кожній з фаз приблизно однакова. В ідеалі вам потрібно досягти відношення

$$P^{(1)} = P^{(2)} = P^{(3)} = \frac{1}{3} P \,. \qquad (27)$$

Таким чином, завдання оптимізації відключень користувачів полягає в мінімізації оціночної функції

$$F(X) = \sum_{k=1,2,3} \left(P^{(k)} - \frac{P}{3} \right)^2 = \sum_{k=1,2,3} \left(\sum_{n=1}^{N} X_n^{(k)} P_n - \frac{P}{3} \right)^2 \qquad (28)$$

Наприклад.

$$F = \left(P^{(1)} - \frac{P}{3} \right)^2 + \left(P^{(2)} - \frac{P}{3} \right)^2 + \left(P^{(3)} - \frac{P}{3} \right)^2$$

У дипломі ми використовуємо метод «Перебору» для вирішення цієї проблеми. Такий підхід досить ефективний для невеликої кількості споживачів. У цій моделі пошук мінімуму здійснюється шляхом «Перебору» всіх можливих способів підключення користувачів до різних фаз ланцюга електропостачання.

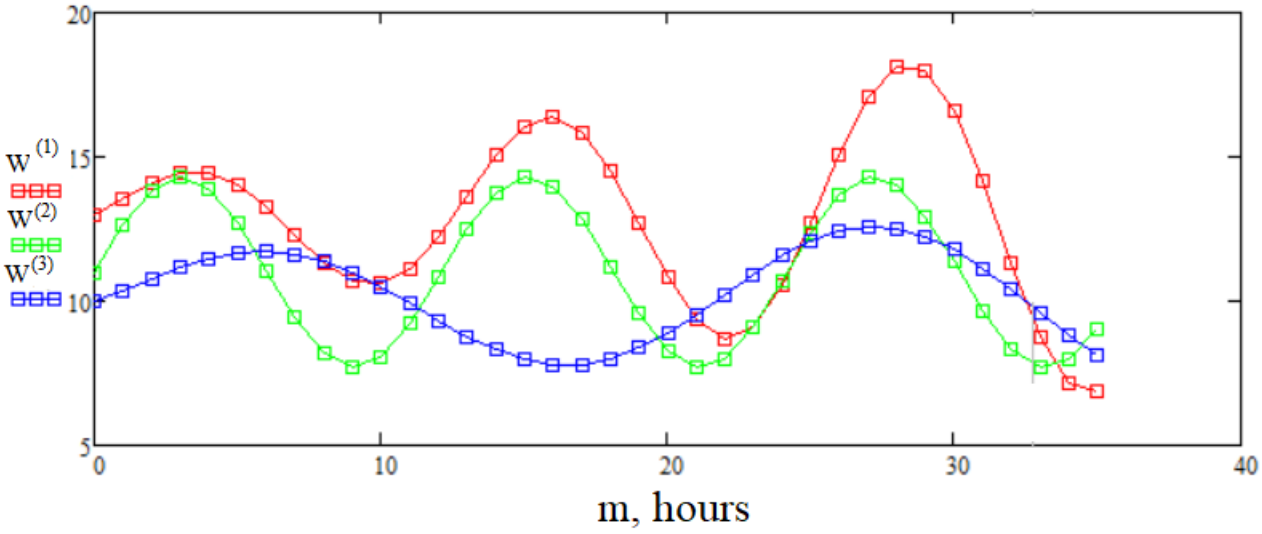


Рис. 3.2. Часова залежність споживання електроенергії за фазами.

3.2. Приклад розв'язання практичної задачі

У дипломі розглядається випадок, коли N = 5 користувачів підключено до загального трифазного кола. Наведено графік споживаної потужності кожної фази (див. Рис. 3.2). Червона лінія відповідає фазі 1, зелена лінія – фазі 2, а синя лінія – фазі 3. Змінна *m* відповідає часу (години).

Рис.3.2. демонструє, що енергоспоживання є незбалансованим. Результати розрахунку цього дисбалансу можна розрахувати за формулою (25). Вони наведені на Рис.3.3.

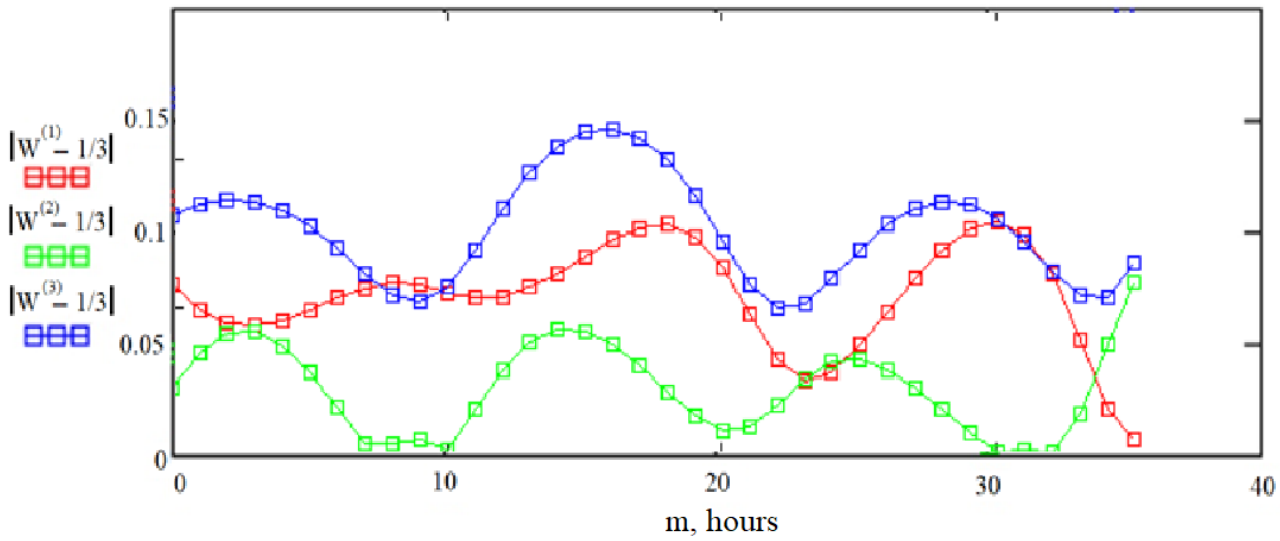


Рис.3.3. Часова залежність дисбалансу споживання електроенергії споживачами за фазами

Також припустимо, що задано початкове підключення користувачей до певної фази, яке наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Первинне підключеня.

Фаза\споживач	1	2	3	4	5
1	1	0	0	1	0
2	0	0	1	0	1
3	0	1	0	0	0

Наше завдання – знайти збалансовано підключення споживачів до фаз. Для розв’язання цієї задачі ми мінімізуємо оціночну функцію (28), перебравши всі можливі зв’язки.

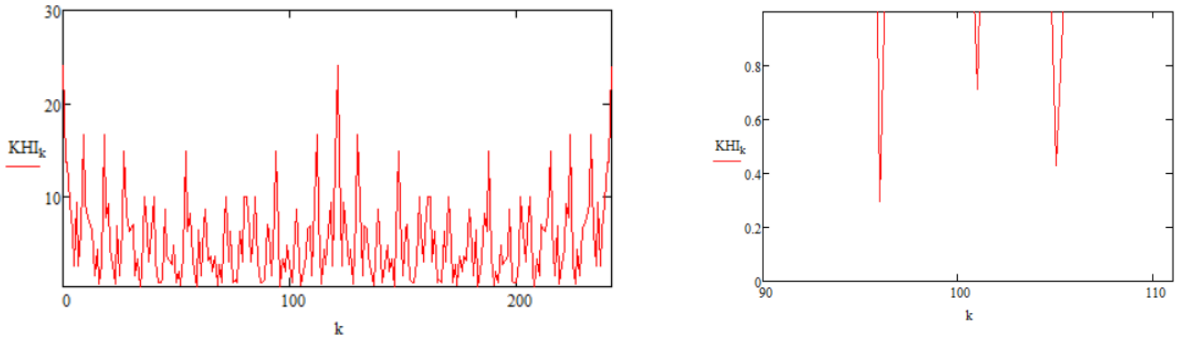


Рис. 3.4. Приклад результатів розрахунків оціночної функції (28). Праворуч збільшений фрагмент біля мінімуму. Змінна k нумерує можливу комбінацію перемикачів: k =1…3^5 = 243.

У таблиці 3.2. наведено результат вибору шуканого підключення користувачей.

Таблиця 3.2. Шукане підключення користувачей

Phase\consumer	1	2	3	4	5
1	0	0	1	0	1
2	0	1	0	0	0
3	1	0	0	1	0

Щоб показати якість шуканого збалансованого способу з’єднання на рис. 3.5. покажемо дисбаланси (28), розраховані для неефективного способу з’єднання (зелена лінія) та для знайденого нами способу (червона лінія). Ми спостерігаємо значне поліпшення якості системи енергоспоживання.

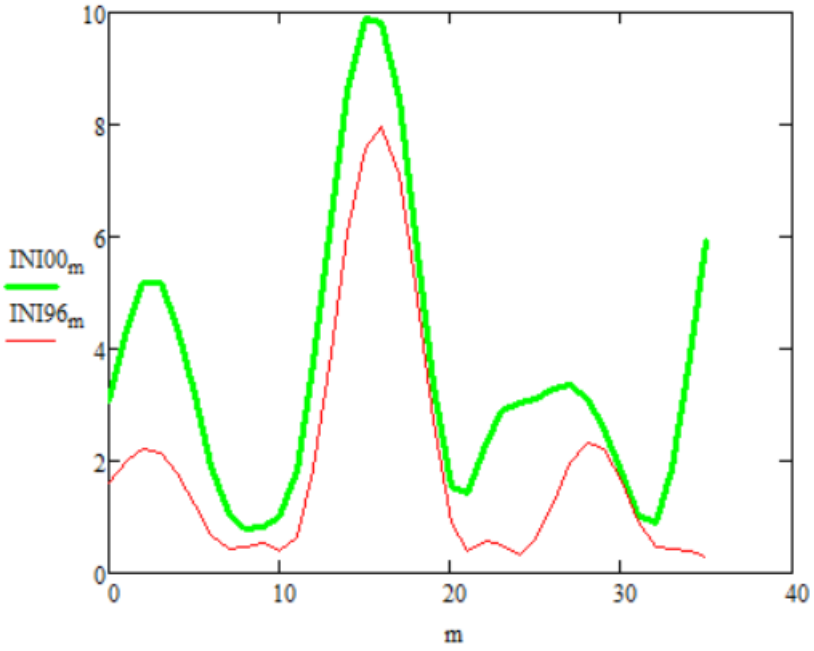


Рис.3.5. Результат обчислення оціночної функції (28), розраховані для неефективного підключення (зелена лінія) і для знайденого ефективного методу (червона лінія). Величина *m* міряється в годинах.

3.3. Висновки до розділу

Таким чином, дослідження, представлене в цьому розділі, демонструє шлях керування навантаженням за часом, пропонуючи відповідні підключення до кожної фази, використовуючи дані про потреби споживачів в електроенергії в різні періоди. Пропонований метод не вимагає перемикань під час аналізу та створює рішення за загальний заданий час; отже, алгоритм впливає якість електроенергії у системі розподілу. Крім того, метод використовує різні відсотки навантаження на кожну фазу, щоб звести до мінімуму ймовірність нездійсненних рішень та знайти оптимальний баланс навантаження. Метод апробований на прикладі даних [57], знизивши коефіцієнт неврівноваженості системи на 15%, що є дуже добрим показником.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі зроблено огляд літератури, аналітичних та комп’ютерних методів визначення ефективності систем електроживлення «розумного» міста або розподілених систем енергопостачання; дано опис основних ідей, що застосовуються для ефективного енергоживлення «розумних» міст та будівель; запропоновано оригінальні методи визначення шляху збалансованого попиту електричної енергії, застосовано ці методи для практичних задач, втілено розроблені алгоритм, та наведено приклади розв’язання реальних задач.

Таким чином, дослідження, представлені в дипломі, демонструють шлях керування навантаженням, пропонуючи відповідні підключення до кожної фази, використовуючи дані про потреби споживачів в електроенергії в різні періоди. Метод апробовано на прикладі даних та інформації з реальної системи, знизивши коефіцієнт неврівноваженості системи на 10%, що підтверджується максимальним значенням неврівноваженості у всіх трьох фазах під час аналізу. Рішення може бути використане як інструмент планування у розподільчих системах, що застосовуються до установок із системами вимірювання споживання електроенергії у різні часові інтервали. Метод може бути реалізований локально в кожному вузлі або вручну або. Подальші дослідження повинні перевірити запропонований метод у польових умовах з використанням розподільчих трансформаторів, розташованих у міських кварталах, щоб визначити переваги та недоліки реалізації та запропонувати можливі коригування. Розширені дослідження повинні виконуватись для кількох вузлів схеми та включати додаткові електричні показники.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. I.N. Da Silva, R.A. Flauzino, (Edited By), “Smart Cities Technologies“, Intech, Rijeka, 2016, On-line available: https://www.intechopen.com/books/smartcities-technologies

2. R. Papa, R. Fistola, (Edited By), “Smart Energy in the Smart City - Urban Planning for a Sustainable Future”, Springer Int. Publishing, Zurich, 2016.

3. C. Aoun, “The Smart City Cornerstone: Urban Efficiency”, Schneider Electric White Paper, 2013.

4. https://kth.instructure.com/courses/293

5. V.A. Katić, B. Dumnić, Z. Čorba, D. Milićević, “Electrification of The Vehicle Propulsion System – An Overview”, Facta Universitatis: Electronics and Energetics, Vol.27, No.2, June 2014, pp.299-316.

6. M.L. Tuballa, M.L. Abundo, “A review of the development of Smart Grid technologies”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.59, June 2016,

pp.710–725.

7. B.M. Buchholz, Z. Styczynski, “Smart Grids –Fundamentals and Technologies in Electricity Networks”, Springer-Verlag, Berlin, 2014.

8. Z.J. Čorba, V.A. Katić, B.P. Dumnić, D.M. Milićević, “In Grid Solar-to-Electrical Energy Conversion”, Thermal Science, Vol. 16, Suppl. 1, 2012, pp. S159-S171.

9. K.R. Shanmugavalli, R. Vedamuthu, “Viability of solar rooftop photovoltaic systems in grouphousing schemes”, Current Science, Vol. 108, No. 6, March 2015, pp. 1080-1085.

10. P. Gagnon, R. Margolis, J. Melius, C. Phillips, R.Elmore, “Rooftop Solar Photovoltaic Technical Potential in the United States: A Detailed Assessment”, NREL, Golden (OR), USA, 2016.

11. G. Papajčik, V. Katić, “Application of Solar PV Systems in Subotica”, Proceedings of the Faculty of Technical Sciences (*Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*), Vol. XXXI, No.15, 2016, pp.2975-2978 (In Serbian).

12. T.N. Pham, M.-F. Tsai, D.B. Nguyen, C.-R. Dow, and D.-J. Deng, “A Cloud-Based Smart-Parking System Based on Internet-of-Things Technologies”, IEEE Access, Vol.3, 2015, pp.1581-1591,

13. http://seevider.com/solution.htm

14. https://www.plugshare.com/

15. http://w3.siemens.com/topics/global/en/intelligent-infrastructure/Pages/intelligent-infrastructure.aspx

16. UN (2014) World Urbanization Prospects, 2014 available at : http://esa.un.org/unpd/wup/highlights/wup2014- highlights.pdf

17. SHUBHANSHUGUPTA,S. KOLANGIAMMAL, T.PADMAPRIYA, “Smart Curtain Using Internet Of Things” International Innovative Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 2, Special Issue, pp. 4-8.

18. S.V.Manikanthan and D.Sugandhi “ Interference Alignment Techniques For Mimo Multicell Based On Relay Interference Broadcast Channel ” International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE) ISSN: 0976-1353 Volume- 7 ,Issue 1 –MARCH 2014.

19. S.V.Manikanthan and T.Padmapriya “Recent Trends In M2m Communications In 4g Networks And Evolution Towards 5g”, International Journal of Pure and Applied Mathematics, ISSN NO:1314-3395, Vol-115, Issue -8, Sep 2017. International Journal of Pure and Applied Mathematics Special Issue

20. Analysis of smart energy supply to smart city – review. K.Karunakaran, N.Shanmugasundaram, S.Pradeep Kumar International Journal of Pure and Applied Mathematics Volume 118 No. 20 2018, 757-762

21. Kong, W.; Ma, K.; Fang, L.; Wei, R.; Li, F. Cost-Benefit Analysis of Phase Balancing Solution for Data-Scarce LV Networks by Cluster-Wise Gaussian Process Regression. Power Syst. IEEE Trans. 2020, 35, 3170–3180. [CrossRef]

22. Zheng, W.; Huang, W.; Hill, D.J.; Hou, Y. An adaptive distributionally robust model for three-phase distribution network reconfiguration. IEEE Trans. Smart Grid 2020, 12, 1224–1237. [CrossRef]

23. Civanlar, S.; Grainger, J.J.; Yin, H.; Lee, S.S.H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. IEEE Trans. Power Deliv. 1988, 3, 1217–1223. [CrossRef]

24. Wang, W.; Yu, N. Maximum marginal likelihood estimation of phase connections in power distribution systems. IEEE Trans. Power Syst. 2020, 35, 3906–3917. [CrossRef]

25. Ukil, A.; Siti, M.; Jordaan, J. Feeder load balancing using combinatorial optimization-based heuristic method. In Proceedings of the 2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Wollongong, NSW, Australia, 28 September–1 October 2008; pp. 1–6. [CrossRef]

26. Chen, C.S.; Cho, M.Y. Energy loss reduction by critical switches. IEEE Trans. Power Deliv. 1993, 8, 1246–1253. [CrossRef]

27. Ma, K.; Fang, L.; Kong, W. Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions. CSEE J. Power Energy Syst. 2020, 6, 479–488.

28. Ganesh, S.; Kanimozhi, R. Meta-heuristic technique for network reconfiguration in distribution system with photovoltaic and D-STATCOM. IET Gener. Transm. Distrib. 2018, 12, 4524–4535. [CrossRef]

29. Al-Kharsan, I.H.; Marhoon, A.F.; Mahmood, J.R. A New Strategy for Phase Swapping Load Balancing Relying on a Meta-Heuristic MOGWO. Algorithm. J. Mech. Contin. Math. Sci 2020, 15, 84–102. [CrossRef]

30. Jena, U.K.; Das, P.K.; Kabat, M.R. Hybridization of meta-heuristic algorithm for load balancing in cloud computing environment. J. King Saud-Univ.-Comput. Inf. Sci. 2020, in press. [CrossRef]

31. Grigoras, , G.; Neagu, B.C.; Gavrilas, , M.; Tris,tiu, I.; Bulac, C. Optimal phase load balancing in low voltage distribution networks using a smart meter data-based algorithm. Mathematics 2020, 8, 549. [CrossRef]

32. Kocarev, L.; Zdraveski, V.; Todorovski, M. Method and System for Dynamic Intelligent Load Balancing. U.S. Patent 10,218,179, 26 February 2019.

33. Azizivahed, A.; Narimani, H.; Naderi, E.; Fathi, M.; Narimani, M.R. A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration. Energy 2017, 138, 355–373. [CrossRef]

34. Fu, L.; Liu, B.; Meng, K.; Dong, Z.Y. Optimal restoration of an unbalanced distribution system into multiple microgrids considering three-phase demand-side management. IEEE Trans. Power Syst. 2020, 36, 1350–1361. [CrossRef]

35. Aprilia, E.; Meng, K.; Zeineldin, H.H.; Al Hosani, M.; Dong, Z.Y. Modeling of distributed generators and converters control for power flow analysis of networked islanded hybrid microgrids. Electr. Power Syst. Res. 2020, 184, 106343. [CrossRef] Symmetry 2021, 13, 2195 20 of 20

36. Ramadhani, U.H.; Shepero, M.; Munkhammar, J.; Widén, J.; Etherden, N. Review of probabilistic load flow approaches for power distribution systems with

photovoltaic generation and electric vehicle charging. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2020, 120, 106003. [CrossRef]

37. Lin, W.M.; Chin, H.C. A current index based load balance technique for distribution systems. In Proceedings of the POWERCON'98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No. 98EX151), Beijing, China, 18–21 August 1998; Volume 1, pp. 223–227.

38. Huang, M. A Receiver-Initiated Approach with Fuzzy Logic Control in Load Balancing. J. Comput. Commun. 2020, 8, 107–119. [CrossRef]

39. Juneja, K. A fuzzy-controlled differential evolution integrated static synchronous series compensator to enhance power system stability. IETE J. Res. 2020. [CrossRef]

40. Torkzadeh, S.; Soltanizadeh, H.; Orouji, A.A. Energy-aware routing considering load balancing for SDN: A minimum graph-based Ant Colony Optimization. Clust. Comput. 2021, 24, 2293–2312. [CrossRef]

41. Siti, M.W.; Jimoh, A.A.; Jordaan, J.A.; Nicolae, D.V. The Use of Support Vector Machine for Phase Balancing in the Distribution Feeder. In Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing 2007, Kitakyushu, Japan, 13–16 November 2007; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2007; pp. 721–729.

42. Jordaan, J.A.; Siti, M.W.; Jimoh, A.A. Distribution feeder load balancing using support vector machines. In Proceedings of the International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning, Daejeon, Korea, 2–5 November 2008; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008; pp. 65–71.

43. Xuan Tung, N.; Fujita, G.; Horikoshi, K. Phase load balancing in distribution power system using discrete passive compensator. IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng. 2010, 5, 539–547. [CrossRef]

44. Baghaee, H.R.; Mirsalim, M.; Gharehpetian, G.B.; Talebi, H.A. Unbalanced harmonic power sharing and voltage compensation of microgrids using radial basis

function neural network-based harmonic power-flow calculations for distributed and decentralised control structures. IET Gener. Transm. Distrib. 2017, 12, 1518–1530. [CrossRef]

45. Tabatabaei, S. A probabilistic neural network based approach for predicting the output power of wind turbines. J. Exp. Theor. Artif. Intell. 2017, 29, 273–285. [CrossRef]

46. Ivanov, O.; Neagu, B.; Gavrilas, M.; Grigoras, G.; Sfintes, C. Phase Load Balancing in Low Voltage Distribution Networks Using Metaheuristic Algorithms. In Proceedings of the 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 9–11 October 2019; pp. 1–6. [CrossRef]

47. Gavrilas, M. Heuristic and metaheuristic optimization techniques with application to power systems. In Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering, Stevens Point, WI, USA, 21–23 October 2010; pp. 95–103.

48. Nicolae, D.V.; Siti, M.W.; Jimoh, A.A. LV self balancing distribution network reconfiguration for minimum losses. In Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 28 June–2 July 2009; pp. 1–6. [CrossRef]

49. Singh, N.K.; Tripathy, M.; Singh, A.K. A radial basis function neural network approach for multi-hour short term load-price forecasting with type of day parameter. In Proceedings of the 2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems, Kandy, Sri Lanka, 16–19 August 2011; pp. 316–321. [CrossRef]

50. Cecati, C.; Kolbusz, J.; Rózycki, P.; Siano, P.; Wilamowski, B.M. A Novel RBF Training Algorithm for Short-Term Electric Load ˙ Forecasting and Comparative Studies. IEEE Trans. Ind. Electron. 2015, 62, 6519–6529. [CrossRef]

51. Shafie, A.H.E.; El-Shafie, A.; Almukhtar, A.; Taha, M.R.; Mazoghi, H.G.E.; Shehata, A. Radial basis function neural networks for reliably forecasting rainfall. J. Water Clim. Chang. 2012, 3, 125–138. [CrossRef]

52. Masoumi, A.; Jabari, F.; Zadeh, S.G.; Mohammadi-Ivatloo, B. Long-Term Load Forecasting Approach Using Dynamic FeedForward Back-Propagation Artificial Neural Network. In Optimization of Power System Problems; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 233–257.

53. Albaradeyia, I.; Hani, A.; Shahrour, I. WEPP and ANN models for simulating soil loss and runoff in a semi-arid Mediterranean region. Environ. Monit Assess. 2011, 180, 537–556. [CrossRef] [PubMed]

54. Gupta, D.K.; Kumar, P.; Mishra, V.N.; Prasad, R.; Dikshit, P.K.S.; Dwivedi, S.B.; Ohri, A.; Singh, R.S.; Srivastava, V. Bistatic measurements for the estimation of rice crop variables using artificial neural network. Adv. Space Res. 2015, 55, 1613–1623.

55. Historical Load Balance in Distribution Systems Using the Branch and Bound Algorithm Jorge Arias, Maria Calle, , Daniel Turizo , Javier Guerrero and John E. Candelo-Becerra Energies 2019, 12, 1219; doi:10.3390/en12071219.

56. Alhmoud, L.; Nawafleh, Q.; Marji,W. Three-Phase Feeder Load Balancing Based Optimized Neural Network Using Smart Meters. Symmetry 2021, 13, 2195. https:// doi.org/10.3390/sym13112195.

57. Valeriya Kopyakova, Kostiantyn Niemchenko, Tetyana Vikhtynska Using of search methods for effective three-phase feeder load balancing, 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems, p.11.