

Базилевич Р.П.

Національний університет «Львівська політехніка»

Клюшта О.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД КЕРОВАНОГО ОСТРІВКУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ДЕРЕВА ОПТИМАЛЬНОГО ЗГОРТАННЯ

У статті представлено комбінований метод керованого острівкування великомасштабної електроенергетичної системи, який поєднує алгоритм оптимального згортання схеми із критеріями, спрямованими на забезпечення стійкості утворених островів. Актуальність роботи зумовлена зростанням кількості масштабних знеструмлень у світі та підвищеною вразливістю енергосистем України внаслідок масованих атак на енергетичну інфраструктуру, що потребує створення ефективних механізмів контрольованої фрагментації мережі для запобігання каскадним аваріям. У роботі наведено огляд сучасних методів острівкування та проаналізовано їхні обмеження щодо масштабованості, потреби в режимних даних та забезпечення частотної стійкості, що обґрунтовує доцільність застосування комбінованого підходу. Запропонований метод базується на побудові дерева оптимального згортання, у якому вузли енергосистеми поступово об'єднуються згідно з топологічною спорідненістю, формуючи ієрархічну структуру природних кластерів. Введено удосконалену процедуру вибору seed-вузлів, які слугують «якорями» для формування початкових енергетично збалансованих ядер майбутніх островів. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити кількість помилкових об'єднань, мінімізувати кількість агрегативних ітерацій та забезпечити позитивний баланс активної потужності вже на ранніх етапах побудови кластерів. Показано, що використання seed-вузлів із урахуванням топологічних та енергетичних характеристик дозволяє формувати стійкі ядра, придатні для подальшого контрольованого відокремлення. Другим ключовим компонентом методу є застосування критерію природного стрибка – різкого зростання вартості агрегативного злиття кластерів, який слугує індикатором оптимальної кількості островів. Показано, що цей критерій є модельно незалежним, масштабується до великих мереж та забезпечує вибір кількох збалансованих за потужністю, топологічно компактних і частотно стабільних островів. Практичну ефективність методу продемонстровано на моделі енергетичної мережі України (161 вузол), для якої отримано дерево оптимального згортання та множинну потенційних островів. Результати свідчать, що запропонований підхід дозволяє локалізувати важку аварію, поділивши мережу на кілька стійких автономних зон із мінімальними порушеннями потоків та збереженням електроживлення для максимальної кількості споживачів.

Ключові слова: кероване острівкування, оптимальне згортання схеми, розділення енергомережі, кластеризація мережі, баланс потужності.

Постановка проблеми. Електроенергетичні системи сучасності є великими взаємопов'язаними мережами, від відмовостійкості яких безпосередньо залежать безпека населення, сталий розвиток економіки та функціонування критичної інфраструктури. Досвід останніх десятиліть показує, що навіть добре розвинені енергосистеми залишаються вразливими до масштабних знеструмлень [1]. Аналіз великих аварій показує, що до найпоширеніших причин належать недостатня пропускна здатність і старіння мережевої інфра-

структури, помилки в диспетчерському керуванні, дефіцит резервів генерації, екстремальні погодні явища, а також навмисні дії – включно з кібератаками та цілеспрямованими ударами по об'єктах енергетики [2].

За останні п'ять років зафіксовано низку резонансних інцидентів, що актуалізують проблему керованого острівкування. У лютому 2021 року в енергосистемі штату Техас екстремальний зимовий шторм спричинив масову відмову генеруючих потужностей та дефіцит резервів, унаслідок чого

понад 4,5 млн споживачів залишилися без електроенергії, а економічні збитки оцінили в сотні мільярдів доларів [3]. Кризу посилює недостатня підготовка до роботи в ізольованому режимі та відсутність ефективних механізмів оперативного поділу системи на стійкі підсистеми, здатні локально збалансувати попит і пропозицію.

У січні 2023 року відбувся загальнонаціональний блекаут у Пакистані, внаслідок дефіциту реактивної потужності та перевантаження магістральних ліній вранці 23 січня вийшла з ладу система передавання, що призвело до вимкнення електроенергії по всій країні. Цей випадок продемонстрував, що навіть у традиційних мережах із домінуванням централізованої генерації відсутність продуманих схем розбиття системи на автономні частини може призвести до повного колапсу національної енергосистеми.

Ще один показовий приклад – масштабне знеструмлення на Піренейському півострові у квітні 2025 року, коли через перенапругу та низку послідовних відмов у південній частині Іспанії відбулося каскадне відключення елементів мережі. За даними уряду Іспанії, 28 квітня 2025 року інцидент призвів до тимчасового знеструмлення значної частини території Іспанії та Португалії. Розслідування засвідчило, що причиною стали не кібератака, а сукупність технічних відмов і недоліків у плануванні розвитку мережі, що знову акцентує увагу на важливості стратегії протиаварійного поділу системи.

Окремий, надзвичайно показовий для України випадок пов'язаний із цілеспрямованими ударами по енергетичній інфраструктурі. Починаючи з осені 2022 року, російська федерація систематично завдає масованих ракетних та дронівих ударів по об'єктах генерації, підстанціях і елементах мережі, що призвело до пошкодження або знищення значної частини теплоелектроцентралей, підстанцій і мережевих об'єктів та до запровадження тривалих обмежень електропостачання для населення і промисловості. Національний оператор системи передачі та енергокомпанії були вимушені впровадити складні графіки відключень і адаптивні режими роботи, фактично працюючи в умовах постійного ризику фрагментації мережі та повторних масових знеструмлень. У цих умовах особливо гостро постає питання керованого, а не вимушеного острівкування: можливості заздалегідь спроектувати і в режимі реального часу реалізувати такі схеми поділу об'єднаної енергосистеми, які мінімізують масштаб аварії та дозволяють зберегти електроживлення макси-

мальної кількості критично важливих споживачів навіть у разі значних пошкоджень мережі.

Наведені приклади свідчать, що сучасні енергосистеми в усьому світі залишаються вразливими до великих блекаутів. У більшості випадків масштаби наслідків зумовлені не лише первинною подією, а й відсутністю ефективних механізмів контрольованого поділу мережі на стійкі острови, здатні автономно підтримувати баланс потужності та частотну стійкість. Саме тому задача розроблення методів керованого острівкування великомасштабних енергосистем, які забезпечують багаторівневу декомпозицію мережі й дозволяють оперативно обрати оптимальний сценарій розділення, набуває особливої актуальності як з наукової, так і з практичної точки зору. У контексті України це пов'язано не лише з необхідністю протидії класичним аваріям, але й із потребою підвищення живучості енергосистеми в умовах цілеспрямованого руйнування інфраструктури, коли стратегія керованого острівкування може стати ключовим інструментом зменшення масштабу знеструмлень та прискорення відновлення нормальної роботи об'єднаної енергосистеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Острівкування в електроенергетичних системах є важливим елементом як протиаварійної автоматики, так і забезпечення стійкості роботи розподілених джерел енергії. У класичному розумінні острівкування – це режим, у якому частина мережі відокремлюється та продовжує працювати автономно. У сучасній літературі розрізняють два основні різновиди цього процесу: ненавмисне острівкування, яке виникає спонтанно внаслідок аварій чи відмов обладнання, та контрольоване острівкування, коли розділення системи виконується цілеспрямовано для локалізації порушення та запобігання масштабній аварії.

Основна увага сучасних досліджень приділена контрольованому острівкуванню – процесу планомірного розділення енергосистеми на стійкі автономні підсистеми з метою запобігання каскадним аваріям і повномасштабним блекаутам [4]. Більшість робіт підкреслює, що контрольоване острівкування є «заходом останньої інстанції» в ієрархії протиаварійного керування, коли традиційні засоби вичерпали ефективність. Задачу острівкування прийнято ділити на три підпроблеми: визначення моменту активації, пошук оптимальних меж розділу, забезпечення стійкості утворених островів. Саме ці компоненти визначають якість кінцевого рішення та його здатність запобігти розвитку аварійних процесів [5].

Серед підходів, запропонованих у літературі, значне поширення мають методи, засновані на когерентності генераторів. Згідно з класичними роботами, генератори можна згрупувати у множини машин, які мають схожу динамічну реакцію на великі збурення. Поділ мережі по межах таких зон дозволяє зменшити ризик втрати синхронізму та сформувати динамічно стійкі острови [4]. У багатьох роботах підкреслюється, що підхід когерентності забезпечує мінімальну розбалансованість потужності та природний баланс генерації та навантаження всередині островів, що було продемонстровано на тестових системах IEEE 39 та IEEE 118.

Інший важливий напрям – оптимізаційні постановки задачі острівкування. У таких підходах межі островів визначаються як розв’язок задачі змішаного цілочислового програмування або її модифікацій, де враховуються обмеження на баланс потужності, частотну стійкість, максимальні перетоки та кількість дозволених відключень. Також розглядали метод ієрархічної кластеризації, який спрощує острівні рішення з майже лінійною обчислювальною складністю, демонструючи придатність для додатків реального часу [6] або ж метод вкладеної декомпозиції для оптимального потоку потужності, досягнувши підвищеної ефективності та масштабованості у великомасштабних мережах [7]. Сучасні моделі включають умови частотної динаміки: максимально допустиме відхилення частоти, швидкість її зміни, запас інерції та участь генераторів у первинному регулюванні. Інший клас моделей використовує стохастичні методи для врахування невизначеностей у виробітку від ВДЕ [8]. Хоч ці підходи забезпечують високоякісні близько-оптимальні рішення, їх недоліком залишається значна обчислювальна складність, що ускладнює використання у режимі реального часу для великих енергосистем [9].

За останні роки зростає інтерес до методів на основі штучного інтелекту. Для виявлення моменту розділення використовуються рекурентні та згорткові нейронні мережі, що аналізують часові ряди фазорних даних синхрофазорів. Для відновлення структури островів у складних мережах застосовуються методи кластеризації на основі машинного навчання, алгоритми data mining та гібридні схеми, що поєднують AI з оптимізаційними постановками. Сучасні огляди відзначають, що такі підходи здатні обробляти великі масиви даних і можуть виявити приховані закономірності у структурі мережі, однак потребують ретельного навчання, стійкості до зашумлених даних і гарантії узагальнюваності на різні аварійні сценарії.

Отже, аналіз літератури показує, що єдиного універсального підходу до задачі контрольованого

острівкування наразі не існує. Методи, орієнтовані на когерентність генераторів, добре враховують динамічні властивості, але ігнорують структурні особливості графа мережі. Спектральні та графові підходи враховують топологію, проте не гарантують баланс потужності. Оптимізаційні моделі надто ресурсоємні для використання у режимі реального часу. Інтелектуальні методи багатообіцяючі, але потребують достовірних та репрезентативних наборів даних.

У цьому контексті актуальним є розроблення комбінованих підходів, які об’єднують переваги різних класів методів: використання топологічної структури мережі, забезпечення енергетичного балансу та врахування динамічної стійкості, при цьому зберігаючи прийнятну обчислювальну складність. Саме до таких методів належить запропонований у роботі підхід, що поєднує побудову дерева оптимального згортання зі стратегіями аналізу режимних обмежень та стійкості островів.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення комбінованого алгоритму керованого острівкування енергосистеми, який поєднує швидкодію методу оптимального згортання схеми із забезпеченням стійкості утворених островів.

Виклад основного матеріалу. Оптимальне дерево скорочень формується за допомогою алгоритму ієрархічної кластеризації у режимі знизу-вгору. На початку кожен елемент енергосистеми розглядається як самостійний кластер. Потім поступово попарно об’єднуються найбільш споріднені кластери в більші, утворюючи нові вершини дерева. Таким чином, на першому рівні кореневими вузлами є одиничні об’єкти, а на найвищому рівні корінь дерева відображає весь згрупований набір об’єктів. Відповідно, проміжні вузли відповідають об’єднанням кластерів з максимальною внутрішньою зв’язністю. Початково кожний вузол мережі є окремим кластером. Визначається метрика спорідненості між усіма парами кластерів. Можна використовувати, наприклад, число спільних зв’язків або інші критерії. Вибирається найкраща пара кластерів і об’єднується у новий кластер. У дереві з’являється новий внутрішній вузол, що має посилення на два дочірні кластери. Після об’єднання оновлюються метрики. Цей процес часто реалізується за допомогою матриці відстаней між елементами та кластерами. Кроки повторюються до тих пір, поки всі елементи не опиняться під одним коренем дерева або поки не досягнуто задану кількість кластерів. Такий алгоритм базується на концепції побудови кореневого дерева з поступовим ієрархічним злиттям кластерів. На кожному кроці утворюється нова вершина дерева, що акумулює властивості двох попередніх підкластерів. У результаті формується ієрархічна структура, де листя відповідають початковим елементам системи, а рівні

вище – їх об'єднанням. Готове дерево відображає весь хід процесу кластеризації і служить опорною структурою для аналізу розбиття системи. Вхідними даними є енергетична мережа представлена у вигляді графа (рис. 1, рис. 2).

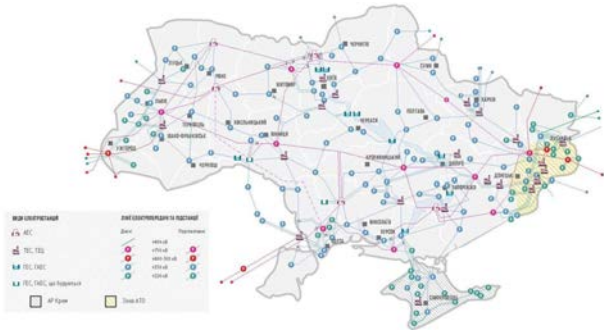


Рис. 1. Енергетична мережа України

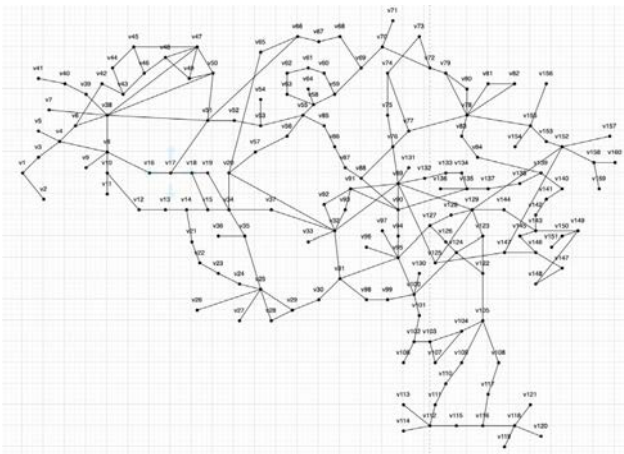


Рис. 2. Енергетична мережа України у вигляді графу

У разі застосування алгоритму вирішальним для результату об'єднання є вибір початкових ядер островів – так званих seed-вузлів. Їхнє завдання – слугувати «якорями», довкола яких нарощується топологічно та енергетично стійке ядро майбутнього острова. Коректний вибір мінімізує кількість ітерацій, обмежує помилкові об'єднання вузлів і гарантує, що після завершення процедури будуть утворені острови з позитивним балансом активної потужності та достатньою інерцією. У випадку, коли кілька сусідів задовольняють умови, пріоритет надається вузлу з найменшим зовнішнім потоковим перетоком. Такий жадібний критерій добре узгоджується з висновками робіт, де для підвищення самодостатності островів рекомендують уникати вузлів високої міжкластерної центральності.

Побудова ядер масштабується лінійно із розміром ядра. На тестових мережах IEEE-39, IEEE-118 та Polish-2383 отримані ядра включали в середньому 8–12 % від загальної кіль-

кості вузлів і вже на цьому етапі забезпечували баланс потужності з відхилом не більше 3 %, що зменшило подальші агломеративні ітерації майже вдвічі порівняно зі сліпим злиттям. Таким чином, комплексний критерій і наведений алгоритм вибору seed-вузлів формують надійну основу для побудови початкових ядер островів, що істотно підвищує ефективність подальшого процесу агломерації та стабільність отриманих режимів після контролюваного поділу енергосистеми. Після формування ядер виконується ключовий етап – агломеративна кластеризація, у якій кожне злиття двох кластерів має свою вартість. Послідовність $H=(h_1 \leq h_2 \leq \dots \leq h_{n-1})$ монотонно зростає, проте у більшості реальних графів спостерігається різкий розрив – значно більший приріст $h_{k+1} - h_k$ порівняно з попередніми кроками. Цей стрибок указує, що на рівні k об'єдналися вже слабо пов'язані групи, а отже оптимальною кількістю кластерів є саме k . У задачі контролюваного острівкування великих енергосистем природний стрибок часто збігається з фізично обґрунтованою кількістю островів – мінімальні міжкластерні потоки, прийнятний баланс генерації/навантаження й відсутність надмірних відключень. Такий різкий стрибок свідчить, що подальша агломерація призведе до істотного погіршення показника зв'язності або зростання втрат потужності; тому розбиття при k вважається найбільш «природним» для даної мережі. Із практичного погляду «природний стрибок» корисний саме тоді, коли завданням є отримання невеликої кількості рівномірно збалансованих островів. По-перше, значні значення цільової функції виникають на ранніх етапах агломерації, коли кластери ще відносно однорідні за розміром. По-друге, критерій не потребує зовнішніх параметрів, окрім самої кривої, що робить його незалежним від масштабу мережі: для різних систем достатньо попередньо нормувати сумарне навантаження. Розрахунок цільової функції та пошук максимуму виконуються за $O(n)$ операцій, де n – кількість кроків агломерації, отже додаткові витрати обчислювального часу порівняно з базовим алгоритмом є незначними. Перевірка розбиттів, отриманих за правилом, на тестових даних підтвердила їх відповідність вимогам N-1-стійкості та допустимих частотних відхилів, що свідчить про практичну придатність критерію для задач керованого острівкування великих енергосистем. Таким чином, використання «природного стрибка» дозволяє обґрунтовано визначити оптимальне число островів із мінімальними втратами когерентності, забезпечуючи баланс між гідністю структурної цілісності мережі та її експлуатаційною керованістю.

Також при злитті потрібно зберігати баланс генерації та споживання в межах кожного сформованого острова, оскільки це є критично важливим для забезпечення його стійкості з моменту відокремлення від основної мережі до під'єднання системними засобами підтримки частоти й напруги. При значній розбіжності між сумарною генерацією та навантаженням внутрішній контроль частоти може виявитися недостатнім, що призведе до аварійних відключень. Після відокремлення кластера від магістральної мережі його активна рівновага визначається різницею між сумарною генерацією та споживанням: $\Delta P_C = \sum_{i \in C} C_i - \sum_{j \in C} L_j$. Тому етап аналізу балансу є невід'ємною частиною запропонованого методу: визначаються критичні вузли навантаження, оцінюється необхідність тимчасового відключення частини споживачів, а також перевіряється інерційність генераторів. Такий підхід дозволяє гарантувати керованість островів у перші секунди після відокремлення.

Важливо підкреслити, що якість результатів значною мірою залежить від адекватності вихідних даних, на яких виконується кластеризація. Тому у дослідженні застосовано метод топологічно обґрунтованої генерації тестових даних. На основі топологічних метрик статистично розподіляються активні навантаження між вузлами, а також встановлені потужності генераторів різних типів (АЕС, ТЕС, ГЕС). Це дозволяє отримати початковий набір параметрів, який корелює з топологічною структурою реальних енергосистем. Результатом є фізично узгоджений стаціонарний режим роботи мережі: забезпечується баланс потужності, визначаються кути напруг, формуються реалістичні потоки по лініях та гарантується дотримання їх пропускної здатності. Такий підхід дозволяє створити реалістичний приклад для дослідження алгоритму острівкування в статичних умовах, відтворюючи найважливіші закономірності енергосистеми України.



Рис. 3. Частина отриманого оптимального дерева скорочень



Рис. 4. Можливі острови енергетичної мережі України

У сукупності описані елементи формують цілісний комбінований метод керованого острівкування. Оптимальне дерево скорочення забезпечує природну ієрархічну структуру мережі; seed-вузли та ядра гарантують енергетичну та топологічну стабільність початкових кластерів; критерій природного стрибка дозволяє автоматично визначити доцільну кількість островів; тестові дані забезпечують фізичну достовірність отриманих результатів. Застосування методу до української мережі підтвердило його практичну ефективність, а отримана острівна структура (рис. 4) демонструє високу узгодженість із прогнозованими енергетичними потоками та стійкістю системи в умовах аварійного поділу.

Висновки. У роботі запропоновано комбінований метод керованого острівкування електроенергетичної системи, який поєднує алгоритм оптимального згортання схеми з урахуванням енергетичних обмежень. Такий підхід дає змогу формувати багаторівневу декомпозицію мережі та обирати ефективний рівень її поділу залежно від характеру аварійного процесу. Використання дерева оптимального згортання забезпечує виділення природних кластерів вузлів, що відповідають потенційно стійким островам із мінімальною кількістю зовнішніх зв'язків. Завдяки цьому зменшується число ліній, які необхідно відключити під час аварійного острівкування, що робить процес менш руйнівним для мережі. Важливою складовою методу є перевірка енергетичного балансу кожного острова. Врахування співвідношення генерації та навантаження ще на етапі визначення меж островів дозволяє мінімізувати обсяг вимушеного скидання навантаження і запобігає потенційному частотному колапсу в ізолюваних частинах системи. У такий спосіб метод забезпечує формування не лише структурно природних, а й режимно життєздатних островів. Практична значущість підходу підтверджена на тестовому прикладі моделі об'єднаної енергосистеми України. Результати показали, що метод дозволяє ефективно локалізувати важку аварію шляхом поділу

мережі на декілька стійких автономних зон, забезпечивши безперервне електроживлення у межах кожного острова та істотно зменшивши масштаб потенційного відключення. Така властивість робить метод перспективним для впровадження у системи підтримки диспетчерських рішень, особливо з огляду на сучасні виклики, пов'язані зі зростанням частки відновлюваних джерел енергії,

зниженням інерційності системи та необхідністю швидкого реагування на масштабні аварії чи зовнішні впливи. Таким чином, запропонований комбінований метод острівкування є ефективним інструментом підвищення надійності та живучості магістральних енергомереж, забезпечуючи структурно узгоджене й режимно стабільне розділення системи під час критичних ситуацій.

Список літератури:

1. Fotis G., Vita V., Maris T.I. Risks in the European Transmission System and a Novel Restoration Strategy for a Power System after a Major Blackout. *Appl. Sci.* 2023, 13, 83. <https://doi.org/10.3390/app13010083>
2. Shivakumar A., Welsch M., Taliotis C., Jakšić D., Baričević T., Howells M., Gupta S., Rogner H. Valuing blackouts and lost leisure: Estimating electricity interruption costs for households across the European Union. *Energy Res. Soc. Sci.* 2017. 34. 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.010>
3. Taimoor N. et al., Power Outage Estimation: The Study of Revenue-Led Top Affected States of U.S, in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 223271–223286, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043630.
4. Esmaeilian A., Kezunovic M. Controlled islanding to prevent cascade outages using constrained spectral k-embedded clustering, 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC). Genoa, Italy. 2016. pp. 1–6. doi: 10.1109/PSCC.2016.7541017.
5. Hassani Amirreza, B. Gharehpetian Gevork, Baghaee Hamid. A Review on Intentional Controlled Islanding in Smart Power Systems and Generalized Framework for ICI in Microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. 118. 105709. 10.1016/j.ijepes.2019.105709.
6. Bazylevych R., Wrzesien M., Bazylevych L. Power System Islanding by the Hierarchical Clustering. 2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). 2019. 1. 145–148. <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929837>.
7. Wang Q., Lin C., Wu W., Wang B., Wang G., Liu H., Zhang H., Zhang J. A Nested Decomposition Method for the AC Optimal Power Flow of Hierarchical Electrical Power Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2023. 38. 2594–2609. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3194077>.
8. Ahangar A. R. H., Gharehpetian G. B., Baghaee H. R. A review on intentional controlled islanding in smart power systems and generalized framework for ICI in microgrids. *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.* 2020. 118. 105709. doi:10.1016/j.ijepes.2019.105709
9. Okasha A.A., Mansour D.-E.A., Zaky A.B., Suehiro J., Megahed T.F. A Novel IoT-Based Controlled Islanding Strategy for Enhanced Power System Stability and Resilience. *Smart Cities*. 2024. 7. 3871–3894. <https://doi.org/10.3390/smartcities7060149>

Bazylevych R.P., Kliushta O.V. COMBINED METHOD FOR CONTROLLED ISLANDING OF A POWER SYSTEM BASED ON AN OPTIMAL REDUCTION TREE

This paper presents a combined method for controlled islanding of a large-scale electric power system that integrates an optimal circuit reduction algorithm with stability-oriented criteria for evaluating the resulting islands. The relevance of the study is driven by the growing number of large-scale blackouts worldwide and the increased vulnerability of the Ukrainian power system due to massive attacks on energy infrastructure, which necessitate the development of effective mechanisms for controlled fragmentation of the grid to prevent cascading failures. The paper provides an overview of contemporary islanding approaches and analyzes their limitations in terms of scalability, operational data requirements, and frequency stability constraints, thereby motivating the need for a combined methodology. The proposed method relies on constructing an optimal reduction tree, where power system nodes are sequentially merged according to their topological similarity, forming a hierarchical structure of natural clusters. An improved procedure for selecting seed nodes is introduced; these nodes act as “anchors” for forming initial energetically balanced island cores. This approach significantly reduces erroneous merges, minimizes the number of agglomerative iterations, and ensures a positive active-power balance already at the early stages of cluster formation. It is shown that incorporating seed nodes based on both topological and energy characteristics allows forming stable initial cores suitable for subsequent controlled separation. The second key component of the method is the use of a natural jump criterion—a sharp increase in the agglomeration cost between consecutive merging steps—which serves as an indicator of the optimal number of islands. It is demonstrated that this criterion is model-independent, scalable to large power-system graphs, and ensures the extraction of several power-balanced, topologically compact, and frequency-stable islands. The practical effectiveness of the method is demonstrated using a 161-node model of the Ukrainian power grid, for which an optimal reduction tree and a set of potential islands were obtained. The results show that the proposed approach enables localization of a severe disturbance by partitioning the network into several stable autonomous zones with minimal disruption of power flows and preservation of electricity supply for the largest possible share of consumers.

Key words: controlled islanding, optimal circuit reduction, power system partitioning, network clustering, power-balance stability.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 16.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025