Микита А.Ю. Геоінформаційні технології в геомоніторингових дослідженнях // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2003. – № 63. – С. 266–271. 14. Лящук Д.Н., Назаревич А.В., Назаревич Л.Є. Геоелектромагнітноемісійний метод в моніторинзі локальних геодинамічних процесів // Вісник КНУ ім. Т.Шевченка. "Геологія". – 2003. – № 26–27. – С. 92–97. 15. Кендзера О., Вербицький Т., Вербицький С., Вербицький Ю. Цифровий сейсмограф для регіональних спостережень та результати його випробувань. –Геодинаміка. – 1998. – №1. – С. 120–126. 16. Назаревич А.В., Мицик Б.Г., Баштевич М.В., Назаревич Р.А. Деформографічні дослідження сейсмотектонічних процесів в Українському Закарпатті (геоінформаційні аспекти). IX International Conference "Geoinformatics – Theory and Applied Aspekts". 11-14 May 2010, Kyiv, Ukraine (CD). 17. Мицик Б.Г., Назаревич А.В., Баштевич М.В., Назаревич Р.А. Безконтактні ємнісні вимірювачі мікропереміщень у деформографічних геофізичних дослідженнях // Відбір і обробка інформації. – 2011. – Вип. 35 (111). – С. 69–76. 18. Назаревич Р., Мархивка В., Струк Є., Назаревич А. Конвертація та препроцесинг даних деформографічного моніторингу // Вісник НУ "ЛП" "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". – Львів. – 2011. – № 694. – С. 334–340. 19. Turner James. MySQL and JSP Web applications. – Sams Publishing, 2002. – 560 с. 20. Маркин А.В. Построение запросов и программирование на SQL. – Рязань, 2008, – 312 с. 21. Jeffrey Richter. Programming Applications for Microsoft Windows – Microsoft Press, 2004. – 723 p.

УДК 004

Р. Базилевич, В. Андрієнко
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра програмного забезпечення

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ОСТРІВКУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ

Досліджено алгоритми бісекціювання графів, їх застосовність до острівкування енергетичних мереж. Проаналізовано алгоритм Кернігана–Ліна, спектральний метод та підхід k-середніх, щодо обчислювальних затрат і придатності до застосування.
Ключові слова: бісекціювання графу, острівкування енергомережі.

The graphs bisectioning algorithms are investigated and their applicability to islanding of the power system. The Kernighan-Lin algorithm, spectral method and multilevel kernel k – means approach have been analyzed with respect to the computational complexity and fitness for use.
Key words: graph bisectioning, power system islanding.

Вступ

Кероване острівкування запобігає хвильовому поширенню аварії в енергетичній мережі з забезпеченням постачання енергії частині її споживачів. Розподілений генератор продовжує постачати живлення, навіть коли деякий з генераторів вилучений [1]. Існують два види острівкування – кероване (умисне) та некероване (природне, неумисне). При керованому острівкуванні генератор в аварійній частині сам від'єднується від мережі і розподілений генератор продовжує живити місцеву мережу. При некерованому острівкуванні генератор не встигає відключитись від живлення мережі після аварії в ній. Таке острівкування є небезпечним явищем, яке супроводжується хвильовим поширенням аварії, несподіваними "живими дротами" (такими, що перебувають під напругою), пошкодженням обладнання споживачів електроенергії та іншими небажаними подіями. Перенавантаження енергосистеми може призвести до нестабільної роботи, а та, своєю чергою, до некерованого острівкування, яке веде до катастрофічних аварій. Кероване ж проводиться з метою локалізації аварії і збереження працездатності максимальної кількості споживачів енергомережі. Кероване острівкування може покращити відновлення систем, управління навантаження мережі і генерацію струму ній. Як зазначили Rajamani et al.(1999) [13] без такого підходу Індія могла б надовго залишатись без світла у 1999 році. За повідомленням Agematsu et al. (2001) [3] некероване острівкування, де не здійснюється контроль за балансуванням активної та реактивної потужності, у 1999 році надовго залишило б Токіо без світла, коли літак врізався в лінії електропостачання. Єдиний вихід з такої ситуації – кероване острівкування. Методи керованого острівкування мають діяти швидко і вчасно, повинні враховуватись витрати на їх розроблення та впровадження, бо якщо вони істотно зростатимуть із розмірами енергосистеми, то їх застосовність буде низькою.

Розглянемо методи та алгоритми керованого острівкування. Математичною моделлю енергетичної мережі є зважений граф *G(N,B),* вершини якого відображають джерела постачання енергії, споживачів та розгалуження, а ребра – лінії передавання енергії. Ваги вершин характеризують потужність, напругу та інші характеристики джерел енергії, ваги ребер – параметри ліній її передавання. Метою керованого острівкування є відокремлення частини споживачів від джерела аварії з мінімізацією кількості ліній розриву. Тобто задача формально зводиться до розбиття графу на дві частини, одна з яких містить джерело аварії, а інша – решту мережі з мінімізацією кількості розривів мережі. З математичного погляду ця задача належить до комбінаторного типу класу ***NP***, оскільки має експоненційну, а саме факторіальну обчислювальну складність. Для задач великих розмірностей методи отримання точного розв'язку, наприклад, гілок та границь, чи повний перебір всіх варіантів, є непридатними, оскільки вимагають дуже великих обчислювальних затрат. Тому більшість досліджень в області розбиття графів переважно мають на меті пошук ефективних евристичних алгоритмів[2]. Більшість запропонованих методів острівкування присвячені розбиванню енергомережі на дві частини, тобто її бісекціюванню.

Аналіз алгоритмів

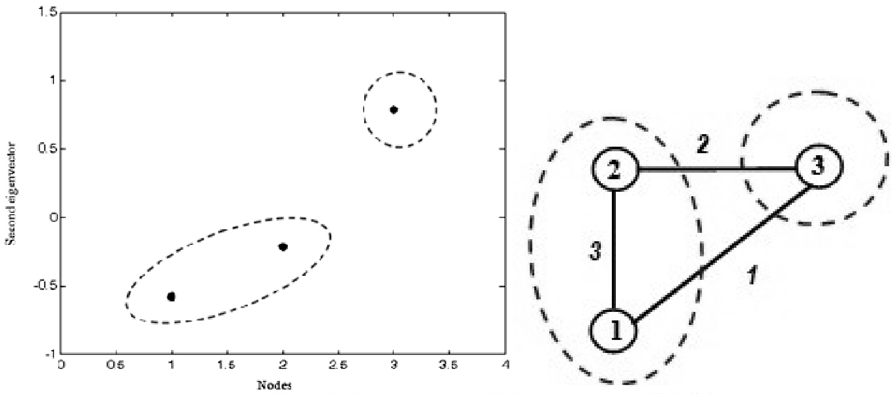
Для керованого острівкування енергомереж та розбиття графів запропоновано ряд методів та алгоритмів [1–21]. В статті Peiravi and Ildarabadi (2009) [2] порівняно обчислювальні вимоги для двох підходів до бісекціювання енергосистеми – "спектрального методу" та "багаторівневого підходу ядра ***k***-середніх". Кращий розв'язок у керованому острівкуванні енергосистем можна отримати лише тоді, коли вона розривається на дві частини, оскільки такий підхід призведе до більших острівців порівняно з багатосекційним її розривом. Відновлення бісекціонованої енергосистеми є легшим, ніж розірваної на багато частин. Обчислювальну складність кожного підходу визначено для декількох великих та польської енергосистем. Karypis and Kumar (1999*)* [9] пропонують розв'язувати задачу за три етапи: укрупнення графу, його поділ та вдосконалення. Вони також представили швидшу модифікацію алгоритму Kernighan-Lin [11]. Метод ***k*** – середніх використовується до таких застосувань як сегментація зображення, соціальний і генний аналіз, мережевий аналіз систем [2]. Kernighan and Lin(1970) [11] запропонували евристичний ітераційний алгоритм бісекціювання, починаючи з початкового ділення навпіл, де в кожній ітерації відшукується підмножина вузлів з кожного попереднього розбиття з найменшою кількістю ребер у перетині.

Cherng et al. (1999)[4] розробили дворівневий алгоритм бісекціювання, який поєднує гібридний метод об'єднання в кластери з повторюваним процесом розбиття інтегрованих схем. Пізніше, Cherng et al. (2003) [5] представили багаторівневий алгоритм бісекціювання шляхом інтеграції техніки кластеризації і повторюваного покращення. Областю застосування цього методу є енергетичні системи, де поділ графу може бути використаний для різноманітних цілей. Задача полягає у відокремленні шини з системи на дві чи більше груп, щоб задовольнити визначену мету. Ця техніка використовується Wang and Vittal (2004)[17] на основі групування даних.

Wang (2008) [16] запропонував адаптивний алгоритм кластеризації мережі з врахуванням початкового потоку потужності і отриманої архітектури, що допоможе дослідити її перехідну стабільність. Розміри малих груп визначають з використанням ряду обмежень. Спектральний аналіз

Лапласа для розбиття графу був застосований Mohar (1991) [18], Hagen (1992)[7] та іншими. При бісекціюванні графи розбиваються на дві частини, використовуючи друге найменше власне значення матриці Лапласа. Відповідні власний та обчислений вектор отримуються на основі розбиття. Щоб сформувати матрицю Лапласа, необхідно мати матрицю суміжності графу. Матриця Лапласа ненапрямленого незваженого графу є симетричною з одним рядком і колонкою для кожного вузла. Якщо власні значення матриці Лапласа відсортовано за збільшенням, власний вектор, відповідний другому найменшому значенню матриці Лапласа (Fiedler вектор) може бути використаний у евристичних алгоритмах для різноманітних маніпуляцій з графами, включно зі спектральним розбиттям графу. Друге найменше власне значення матриці Лапласа є більшим за 0 тільки якщо граф є зв'язним. Матриця Лапласа формується так: елемент, для якого $i = j$, є сумою гілок, прилеглих до відповідної вершини. Інші значення визначаються як протилежне значення гілки, яка спрямована від вершини i до вершини j. Далі визначаються власні значення і матриця власних векторів. Другий стовпчик (або рядок) цієї матриці називається Fiedler вектор, його може бути використано для бісекціювання графу, як показано на рис. 2, де по осі ординат - власний вектор та по осі абсцис – вузли. Обчислювальні затрати для визначення власних значень і Fiedler вектор є "вузьким місцем" алгоритму бісекціювання, оскільки мають обчислювальну складність $O(n^3)$. Визначення Fiedler вектор є найбільш затратною операцією в обчислювальному відношенні частиною розбиття.

Для пришвидшення отримання розв'язку в багатьох випадках Fiedler вектор апроксимують. Багаторівневі версії спектрального методу, які використовують його на різних рівнях, широко використовуються. Holzrichter and Oliveira (1999) [8] запропонували спектральний підхід, в якому визначення вектору Fiedler здійснюється з застосуванням Davidson algorithm [8].



$$V = \begin{bmatrix} 0.5774 & -0.5774 & -0.5774 \\ 0.5774 & -0.2113 & 0.7887 \\ 0.5774 & 0.7887 & -0.2113 \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Розбиття графу з використанням ***Fiedler*** *вектора [2]*

Хоча мінімальна нестабільність генерації/навантаження є дуже важливим фактором в острівкуванні, інші вимоги також необхідно враховувати. За пропозицією Rehtanz (2003) [14] спектральне бісекціювання енергосистеми може бути виконане так:

1. Визначити енергетичний потік мережі.
2. Моделювати енергомережу графом $G(N,B)$ з n вершинами і b ребрами:

2.1. Кожний вузол енергомережі є вершиною графу G.

2.2. Кожна лінія передавання енергомережі є ребром графу G.

2.3. Визначити вагу кожного ребра графу G як абсолютну величину потоку потужності лінії передавання.

3. Визначити матрицю Лапласа Q графу $G(N,B)$:

3.1. Обчислити матрицю суміжності *A* та діагональну матрицю *D* графу *G(N,B)*.
3.2. Задати матриця Лапласа як *Q = D-A*.
4. Обчислити друге найменше власне значення l_2 матриці Лапласа *Q*.
5. Обчислити зв'язний з l_2 дійсний власний вектор x_2 .
6. Відобразити x_2 в евристичному розбитті вектора графу *G(N,B)*.
6.1. Впорядкувати записи x_2, щоб отримати посортований вектор *v* індексів вузла.
6.2. Помістити всі вузли в розбиття *U*.
6.3. Для *i=1* до *n-1*:
Перемістити вектор n_i з розбиття *U* до розбиття *W*. Обчислити скорочення розміру розбиття.

7. Знайти оптимальне розбиття (U^*,W^*), котре матиме мінімальне скорочення встановленого розміру з поміж *(n-1)* різноманітних розбиттів для знаходження кінцевого результату.

Спектральне розбиття і використання багаторівневого ядра *k* середніх схожі математично, і це допомагає розробити алгоритм розбиття, кращий щодо швидкості, зберігання пам'яті і якості, як показано в Dhillon (2005) [6]. Peiravi and Ildarabadi (2009) [11] запропонували застосувати метод багаторівневого ядра *k* середніх для керованого острівкування. Оскільки в цьому підході немає необхідності обчислювати власні значення і власні вектори, він є набагато швидшим, ніж спектральний метод. Підхід використовує запропонований цими авторами метод Metis.

Для керованого острівкування доцільно також використати метод оптимального згортання схеми [19–23]. За цим методом вперше (1974 р.) запропоновано розбиття схеми здійснювати за декілька етапів: виділення ієрархічно вкладених кластерів шляхом згортання схеми за вибраними критеріями, вибір на дереві згортання бажаного початкового розбиття, найкраще наближення до заданих обмежень та його оптимізація. Як показали дослідження, метод має лінійно-логарифмічну обчислювальну складність, що робить його придатним для задач великих розмірностей, можливість забезпечення різноманітних обмежень, зокрема вибору довільної кількості частин розбиття, виконання багаторівневого розбиття та забезпечує високу якість отриманих розв'язків.

Обчислювальна складність алгоритмів

Обчислювальні складності алгоритмів острівкування енергосистеми залежать від їх методики. Це "вузьке місце" підходу визначає можливість застосування запропонованого алгоритму, оскільки необхідною є швидка реакція у випадку виникнення аварії. Для спектрального підходу така складність визначається кількість затрат, необхідних на обчислення власних значень і власних векторів матриці Лапласа. Для щільної матриці Лапласа ця складність є $O(n^3)$. У реальних енергосистемах, які описуються сильно розрідженим графом, це не вимагало б значних обчислювальних затрат.

Обчислювальна складність в підході багаторівневого ядра *k* - середніх є $O(n^2)$ для кожного повторення. У сучасних великих енергосистемах, де має місце висока розрідженість, кожна ітерація буде мати тільки $O(nz)$ операцій, де *z* означає кількість відмінних від нуля записів в матриці, яка є пропорційною до кількості ліній енергосистеми. Тут немає потреби обчислювати власні вектори, що значно зменшує обчислювальну складність і робить її близькою до $O(nz)$, що є набагато менше, ніж для спектрального підходу.

Peiravi and Ildarabadi (2009) [2] дослідили спектральний і підходу багаторівневого ядра *k* - середніх для трьох типових енергосистем: IEEE 118, IEEE 300 і польської 2746. Набагато менше обчислювального часу потрібно для підходу багаторівневого ядра *k* – середніх в порівнянні із спектральним підходом (рис. 2).

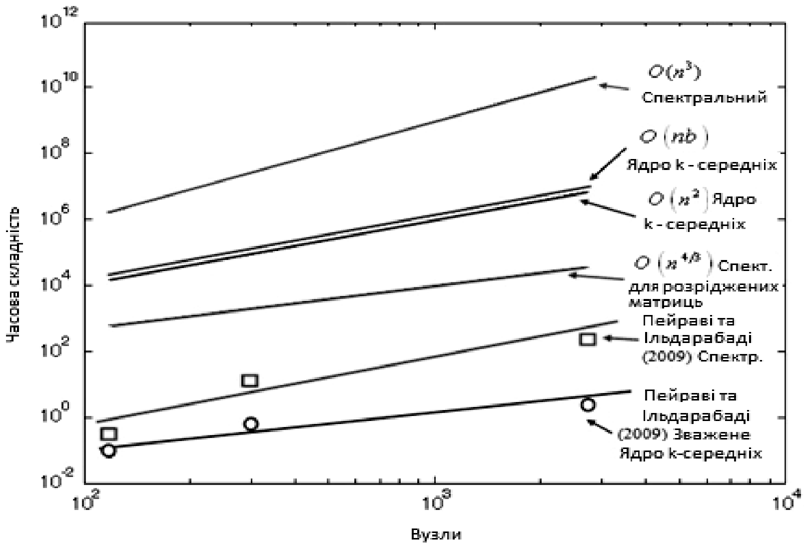


Рис. 2. Порівняння очікуваних вимог часу[2]

Висновки

Всі операції зміни структури енергосистеми для її острівкування при виникненні аварії повинні бути виконані за дуже малий час. Вважається, що всі обчислення для керованого острівкування повинні бути виконані за час, менший ніж 500 мс [2]. Багато запропонованих методик острівкування є повільними для оперативного застосування до великих енергосистем. Аналізуючи наявні методи і алгоритми їх острівкування, можна зробити висновок, що їх "вузьким місцем" є велика обчислювальна складність, не завжди достатня якість та можливість врахування бажаних обмежень. Якщо мережа сама не встигає за певний час локалізувати проблему, то кероване острівкування може підвищити її надійність. Погана ситуація наступає, коли нестабільність напруги в мережі разом із дисбалансом між навантаженням мережі та генерацією струму, призведе до непоправимих наслідків. Єдиний вихід з цієї ситуації – це кероване острівкування. Для цього необхідно розробити швидкі, надійні і не дуже затратні методи та програмне забезпечення, які б вирішили проблему острівкування енергетичної мережі під час збою в системі, та інші подібні проблеми. Бажаним з цією метою є застосування методу оптимального згортання схеми [19-23].

1. http://uk.wikipedia.org/wiki/Острівкування. 2. Peiravi A., R. Ildarabadi. "Comparison of Computational Requirements for Spectral and Kernel k-means Bisectioning of Power Systems", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(3): 2366-2388, 2009. 3. Agematsu, S., S. Imai, R. Tsukui, H. Watanabe, T. Nakamura, T. Matsushima. "Islanding Protection System with Active and Reactive Power Balancing Control for Tokyo Metropolitan Power System and Actual Operational Experiences," in Proceedings of the 7th IEE Int. Conf. Developments in Power System Protection, pp: 351–354. , 2001. 4.Cherng, J., S. Chen, C. Tsai, J. Ho, 1999. An efficient two-level partitioning algorithm for VLSI circuits, Proceedings of the 1999 Design Automation Conference, ASP-DAC '99, Asia and Pacific, 1: 69-72, Wanchai, Hong Kong, 18-21 Jan. 1999. 5.Cherng, J., S. Chen, 2003. An efficient multi-level partitioning algorithm for VLSI circuits, Proceedings of the 16th 70-75. International Conference on V LSI Design (VLSI'03), 4-8 January 2003. 6.Dhillon, Inderjit S., Guan, Yuqiang, Kulis, Brian, 2005. "A Fast Kernel Based Multilevel Algorithm for Graph Partitioning," In the Proceedings of the 11th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery Data Mining (KDD), pp: 629-634. 7. Hagen, L., A.B. Kahng, 1992. "New Spectral Methods for Ratio Cut Partitioning and Clustering," IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 11(9): 1074-1085. 8.Holzrichter, M ., S. Oliveira, 1999. A graph based method for generating the Fiedler vector of irregular problems, Proceedings of the 11 IPPS/SPDP'99 Workshops Held in Conjunction with the 13th International Parallel Processing Symposium and 10th Symposium on Parallel and Distributed Processing, San

Juan, P.R., pp: 978-985. 9. Karypis, G., V. Kumar, 1999. "A Fast and High Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs", SIAM J. Scientific Computing, 20(1): 359-392. 10. http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/fetch/papers/mlSIAM SC99. 11. Kernighan, B.W., S. Lin, 1970. "An efficient heuristic procedure for partitioning graphs," The Bell System Technical Journal, 49(2). Peiravi, A., R. Ildarabadi, 2009. A fast algorithm for intentional islanding of power systems using the multilevel kernel k-means approach, Journal of Applied Sciences, 9(12): 2247-2255. 12. Rajamani, K., U.K. Hambarde, 1999. "Islanding and Load Shedding Schemes for Captive Power Plants," IEEE Trans. on Power Del., 14(3): 805–809.13. Rehtanz, C., 2003. Autonomous systems and intelligent agents in power system control and operation, Springer. 14. Venkatasubramanian, V., J. Quintero, 2005. "Detection, Prevention and Mitigation of Cascading Events-Part II", Power System Engineering Research Center, A National Science Foundation Industry/University Cooperative Research Center Since 1996, PSERC Publication 05-60.15.Vittal, V., Xiaoming Wang, 2005. "Detection, Prevention and Mitigation of Cascading Events-Part III", Power System Engineering Research Center, A National Science Foundation Industry/University Cooperative Research Center Since 1996, PSERC Publication 05-61, October 2005.16.Wang, X.Z., Z. Yan, W. Xue, 2008. "An adaptive clustering algorithm with high performance computing application to power system transient stability simulation", 3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008, art. no. 4523578, pp: 1137-1140.17.Wang, X., Vittal, V., 2004. "System Islanding using Minimal Cutsets with Minimum Net Flow", In Proceedings of the IEEE Power Eng. Soc. Power Syst. Conf. Expo., New York, 1: 379-384.18.Mohar, B., 1991. "The Laplacian Spectrum of Graphics," in Graph Theory, Combinatorics, and Applications, Vol. 2, Ed. Y. Alavi, G. Chartrand, O . R. O ellermann, A. J. Schwenk, W iley, New York, pp: 871-898. 19. Базилевич Р.П. "Декомпозиционные и топологические методы автоматиированного проектирования электронных устройств", Львов, "Вища школа", 1981, 168 С.20.R.P. Bazylevych, R.A. Melnyk, O.G. Rybak. "Circuit partitioning for FPGAs by the optimal circuit reduction method". In: VLSI Design, Vol. 11, No 3, pp. 237-248, 2000.21.Bazylevych R.P. "The optimal circuit reduction method as an effective tool to solve large and very large size intractable combinatorial VLSI physical design problems". In: 10-th NASA Symp. on VLSI Design, March 20-21, 2002, Albuquerque, NM, USA, pp. 6.1.1-6.1.14. 22.R. Bazylevych, I. Podolskyy and L.Bazylevych. "Partitioning optimization by recursive moves of hierarchically built clusters". In: Proc. of 2007 IEEE Workshop on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems. April, 2007, Krakow, Poland, pp. 235-238.23.Roman Bazylevych, Marek Pałasiński, Dmytro Yanush, Lubov Bazylevych. "Partitioning Optimization by Iterative Reassignment of the Hierarchically Built Clusters with Border Elements", 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO – 2013, Budva, Montenegro, pp.219-222.