

ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ІНДИКАТОРІВ ПОШКОДЖЕНЬ НА РОЗПОДІЛЬНІЙ ЛІНІЇ ЯК ЗАДАЧА КОМБІНАТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Є.В.Парус, канд.техн.наук, **Блінов І.В.**, канд.техн.наук, **О.Ю. Бець**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.
e-mail: igorblinov@mail.ru

Досліджено формальну постановку задачі вибору кількості та місць встановлення індикаторів пошкоджень на повітряних лініях електропередавання розподільних мереж та методи її розв'язання. Наведено цільову функцію як задачу максимізації різниці витрат електропостачальної компанії при експлуатації лінії електропередавання без встановлення індикаторів пошкоджень та з ними. Показано ієрархічну вкладеність комбінаторних задач, розв'язання яких необхідне для отримання максимуму цільової функції. Запропоновано використовувати систему емпіричних правил для зниження рівня комбінаторності поставленої задачі. Бібл. 6.

Ключові слова: індикатори пошкоджень, розподільна лінія, комбінаторна оптимізація.

Однією із важливих складових скорочення незапланованих перерв у електропостачанні є задача мінімізації часу на пошук пошкодженої ділянки розподільної лінії електропередавання. Ця задача особливо актуальна в розподільних мережах 6/10/35 кВ, для яких характерні велика кількість відгалужень та наявність ділянок з ускладненим доступом до траси ЛЕП. Один із дієвих способів зменшення часу на пошук місця аварії у таких лініях, що набуває розповсюдження в країнах Європи, – використання індикаторів пошкоджень (ІП). Проте, через високу вартість таких пристроїв рішення про встановлення ІП на розподільній лінії вимагає обґрунтування доцільності та економічної ефективності.

Оцінка ефективності використання ІП на розподільних лініях електропередавання здійснюється шляхом розв'язання задачі вибору кількості та місць встановлення ІП [1]. Дана задача є NP-важкою задачею комбінаторної оптимізації. Тому для її розв'язання дослідники різних країн пропонують застосовувати евристичні методи або спрощені методи оцінки ефекту від встановлення та використання ІП. Так у [1] запропоновано розвинуту математичну модель багатоцільової функції, в якій порівнюються економічні витрати на застосування ІП та втрати від недопостачання електроенергії внаслідок аварій у цих мережах. Основними цілями такої моделі є підвищення надійності електропостачання системи і зниження вартості затрат, пов'язаних із встановленням та обслуговуванням ІП. Ефективність використання такого методу щодо підвищення надійності порівнюється за допомогою міжнародних індексів показників надійності SAIDI, CAIDI, SAIFI і ENS. У [2] спрощену оцінку ефективності використання індикаторів пошкоджень пропонується здійснювати за допомогою індексу показника надійності електропостачання SAIDI без використання індикаторів та після їхнього встановлення. Таке спрощення постановки задачі до суто технічних критеріїв оптимізації виправдане лише за умов, коли недотримання нормативних показників надійності апріорі невикликане внаслідок штрафних санкцій.

Крім того різняться і методи розв'язання поставленої задачі. Так, наприклад, в [1] запропоновано застосування генетичного алгоритму, а в [2] вказано на зручність використання імунного алгоритму. В [3] задачу пошуку оптимальних місць встановлення індикаторів пошкоджень на лінії пропонується розв'язувати за допомогою алгоритму імітації поведінки жаби, а в [4] – на основі методу рою частинок (MOPSO). На противагу евристичним методам, що знаходять деяке прийнятне наближення, але не гарантують досягнення глобального мінімуму цільової функції, деякі розробники (наприклад, у [5]) пропонують зменшити рівень комбінаторності шляхом врахування особливостей структури окремої ЛЕП. Такі підходи до розв'язання поставленої задачі придатні для аналізу лише окремих ЛЕП, проте демонструють можливість уникнення комбінаторного вибуху шляхом врахування топологічних властивостей ЛЕП та розкладання задачі вибору оптимальної кількості та місць встановлення ІП на ряд більш простих підзадач.

Метою даної статті є демонстрація можливості декомпозиції задачі оцінки ефективності використання ІП на розподільній ЛЕП на групи підзадач, що розв'язуються без комбінаторного перебору.

Розглянемо лінію електропередавання радіальної розподільної мережі без секціонуючих комутаційних апаратів із сумарним розрахунковим навантаженням P_{Σ} та усередненим значенням відпускнуго тарифу на електроенергію для споживачів $C_{\text{сеп}}$. Нехай середньостатистична аварійність $\tau_{\text{сеп}}$ має рівномірний розподіл на всіх ділянках ЛЕП. Тоді цільова функція задачі вибору кількості та місць встановлення ІП на ЛЕП як різниця між втратами при експлуатації ЛЕП без індикаторів та з індикаторами має наступний вигляд:

$$B^{(zi)} - B^{(bi)} = P_{\Sigma} \cdot C_{\text{сеп}} \cdot \tau_{\text{сеп}} \cdot \sum_{i=1}^N (I^{(i)} \cdot (t_{\text{пош}}^{(bi)(i)} - t_{\text{пош}}^{(zi)(i)})) - \left(\frac{B_{\text{км}}^{(1i)}}{T_E} + B_{\text{шо}}^{(1i)} \right) \cdot K_i \rightarrow \max ,$$

де $B^{(3i)}$ – витрати енергопостачальної компанії при реалізації проекту встановлення ІП; $B^{(6i)}$ – витрати енергопостачальної компанії при функціонуванні ЛЕП без ІП; $l^{(i)}$ – довжина i -ї ділянки ЛЕП; $t_{\text{пош}}^{(6i)(i)}$ – тривалість пошуку місця пошкодження при аварії на i -й ділянці лінії при функціонуванні ЛЕП без ІП; $t_{\text{пош}}^{(3i)(i)}$ – тривалість пошуку пошкодження при аварії на i -й ділянці лінії при функціонуванні ЛЕП з ІП; $B_{\text{км}}^{(1i)}$ – усереднені витрати на купівлю та монтаж одного ІП; $B_{\text{щ}}^{(1i)}$ – усереднені щорічні витрати на обслуговування одного ІП; K_i – кількість ІП, встановлених на лінії; T_E – плановий термін експлуатації ІП.

Задача вибору кількості та місць встановлення індикаторів пошкоджень з цільовою функцією має дві адитивні складові:

- розрахунок втрат від недовідпуску електроенергії як функцію від зниження тривалості пошуку пошкодженої ділянки лінії;

- обчислення витрат на купівлю, встановлення та обслуговування індикаторів пошкоджень.

Зміна кількості та місць встановлення ІП впливає відповідно на зміну тривалості пошуку пошкодженої ділянки розподільної лінії. При цьому в загальному випадку може змінитися і оптимальний маршрут огляду лінії. Отже, обидві складові цільової функції пов'язані алгоритмічно і не можуть аналізуватися окремо одна від одної. Таким чином, пошук екстремуму функції має здійснюватися шляхом розв'язання кількох задач рекурсивно. Тоді задача оцінки ефективності використання ІП на розподільній ЛЕП як об'єднання вкладених взаємопов'язаних підзадач матиме наступну структуру:

- перший цикл оптимізації: задача визначення кількості індикаторів пошкоджень та місць їхнього встановлення, за яких досягається максимум цільової функції;

- другий цикл оптимізації: для заданих кількості та місць встановлення індикаторів пошкоджень визначається найшвидший маршрут огляду ЛЕП;

- третій цикл оптимізації: для поточного маршруту огляду ЛЕП моделюються аварійні ситуації на всіх ділянках розподільної лінії;

- четвертий цикл оптимізації: для поточної аварійної ситуації моделюється прохід за поточним маршрутом огляду ЛЕП для розрахунку часу знаходження місця аварії.

Третій та четвертий цикли оптимізації разом мають лінійний рівень комбінаторної складності. При цьому обсяг обчислювальних дій на цих рівнях скоротити неможливо, оскільки саме на цих рівнях здійснюються розрахунки складових втрат від недовідпуску електроенергії.

Другий цикл оптимізації – пошук найшвидшого маршруту огляду ЛЕП – це NP-важка задача комбінаторної оптимізації, яка не має детермінованого алгоритму розв'язання. Проте, враховуючи особливості визначення стратегії огляду ЛЕП, принципово можна звести задачу оптимізації маршруту до задачі «китайського листоноші», для якої існує ефективний алгоритм розв'язання [6].

На першому циклі оптимізації за критерії оптимізації застосовуються такі атрибути, як кількість індикаторів пошкоджень та місця їхнього встановлення. Оскільки ефективність кожного з варіантів рішень розраховується алгоритмічно за результатами, отриманими на внутрішніх циклах оптимізації, то практично неможливо визначити напрямок пошуку оптимального рішення. Проте на рівні першого циклу оптимізації можна уникнути необхідності виконувати комбінаторний перебір варіантів, якщо задачу визначення кількості ІП та місць їхнього встановлення розбити на дві підзадачі моніторингу аварійних станів:

- на відгалуженнях розподільної лінії;

- на ділянках з ускладненим доступом до траси ЛЕП.

Як показали дослідження, для кожної з двох наведених вище задач можна створити ефективний алгоритм розв'язання на основі евристичних правил, що враховують особливості топологічного графу, яким формально подається ЛЕП. Опис таких правил та особливості алгоритмів зазначених задач виходять за рамки даної публікації.

У статті показано доцільність розв'язання задачі оцінки ефективності використання ІП на розподільній лінії електропередавання без комбінаторного перебору. З цією метою здійснюється декомпозиція задачі на підзадачі, для яких існує ефективний алгоритм розв'язання. Додатково, на рівні першого циклу оптимізації залучаються емпіричні правила топологічного аналізу. Реалізація наведеного підходу дозволяє здійснювати аналіз ефективності використання ІП на ЛЕП довільної структури за прийнятні для проектних рішень час і вартість встановлення ІП.

1. *Jahedi A., Javidan J., Nasiraghdam H.* Multi-objective modeling for fault indicators placement using of NSGA II to reduce off time and costs in distribution network // *Technical and Physical Problems of Engineering.* – 2014. – Vol. 6. – Issue 21. – No 4. – Pp. 106–111.

2. *Chin-Ying Ho, Tsung-En Lee, Chia-Hung Lin.* Optimal placement of fault indicators using the immune algorithm // *IEEE Transactions on Power Systems.* – 2011. – Vol. 26. – No 1. – Pp. 38–45.

3. *Akbari M., Ghaffarzadeh N.* Optimal fault indicator placement in distribution networks using SFLA algorithm // *World Applied Programming.* – 2014. – Vol. 4. – No 8. – Pp. 181–192.

4. *Shahsavari A., Mazhari S.M., Fereidunian A., Lesani H.* A Fault Indicator Deployment in Distribution Systems Considering Available Control and Protection Devices: A Multi-Objective Formulation Approach // *Power Systems, IEEE Transactions.* – 2014. – Issue 5. – Vol. 29. – Pp. 2359 – 2369.

5. *Salazar A., Zapata G., Garcia R.* Fault-Indicator-Based Methodology for Distribution Power Systems Fault Location. Available at: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/SICEL/article/viewFile/38589/43588>. (accessed 12.02.2016)

6. *Edmonds J., Johnson E.L.* Matching Euler tours and the Chinese postman problem // *Mathematical Programming.* – 1973. – No 5. – Pp. 88–124.

УДК 621.316:681.3

ВЫБОР КОЛИЧЕСТВА И МЕСТ УСТАНОВКИ ИНДИКАТОРОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ КАК ЗАДАЧА КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Е.В.Парус, канд.техн.наук, **И.В. Блинов**, канд.техн.наук, **Е.Ю. Бец**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
e-mail: igorblinov@mail.ru

Исследованы формальная постановка задачи выбора количества и мест установки индикаторов повреждений на линиях электропередачи распределительных сетей и методы ее решения. Осуществлен анализ целевой функции как задачи максимизации разницы расходов электроснабжающей компании при эксплуатации линии электропередачи без установки индикаторов повреждений и с ними. Показано иерархическую вложенность комбинаторных задач, решение которых необходимо для получения максимума целевой функции. Предложено использовать систему эмпирических правил для снижения уровня комбинаторности поставленной задачи. Библ. 6.

Ключевые слова: индикаторы повреждений, распределительная линия, комбинаторная оптимизация.

УДК 621.316:681.3

FAULT INDICATORS LOCATION AND QUANTITY SELECTION ON DISTRIBUTION LINE AS A PROBLEM OF COMBINATORIAL OPTIMIZATION

Ye.V. Parus, I.V. Blinov, O.Yu. Bets
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.
e-mail: igorblinov@mail.ru

In the article the problem statement of fault indicators location and quantity selection on distribution line and methods of its solving are studied. The objective function is performed as the problem of maximization of charges differential of power supply utility when exploiting distribution line with/without fault indicators. The hierarchical nesting of combinatorial problems which is necessary for calculation of maximum of objective function is shown. The rules of thumb set for reducing of combinatorial level of the problem is proposed. References 6.

Key words: fault indicator, distribution line, combinatorial optimization.

Надійшла 14.02.2016
Остаточний варіант 06.04.2016