

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ГІЛОК І ГРАНИЦЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розглянуто питання розробки і використання методів та алгоритмів оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем, що забезпечують ефективне розв'язання поставленої задачі розвитку, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей. Суть запропонованого методу гілок і границь полягає в розбиванні множини варіантів розвитку мережі на підмножини, що не перетинаються, і послідовне виключення підмножин безперспективних розв'язків. При цьому кожній підмножині ставляться у відповідність зовнішні і внутрішні оцінки. Розв'язуючи задачу вибору оптимального варіанта розвитку мережі дроблення підмножин здійснюється за ознакою наявності або відсутності в розглянутій підмножині тієї чи іншої гілки. Для визначення зовнішніх і внутрішніх оцінок на кожному кроці оптимізації повинні бути знайдені найкоротші електричні мережі та розв'язані транспортні задачі з проміжними перевезеннями для підмножин порівнюваних варіантів розвитку електричної мережі. Необхідно зазначити, що оскільки кількість дроблень підмножин залежить від порядку розгляду допустимих гілок електричної мережі, ефективність використання методу гілок і границь істотною мірою залежить від ефективності алгоритму вибору гілки дроблення на кожному кроці оптимізації. Кількість можливих варіантів розвитку електричної мережі є кінцевою величиною, тому, після виконання певної кількості кроків дроблення множини, сукупність варіантів розвитку, що залишилися, виявиться настільки малою, що може бути визначена точна нижня границя зміни функції дисконтованих витрат кожної з підмножин. Той варіант розвитку мережі, що відповідає меншій з нижніх границь, і є оптимальним. Запропонований алгоритм, що використовує метод гілок і границь, має досить високий рівень збіжності та стійкості до вибору початкових наближень.

Ключові слова: електрична мережа, енергосистема, оптимізація розвитку, технічні та ресурсні обмеження, елементи мережі.

Вступ

Розвиток електричних мереж енергосистем потребує розв'язання задач вибору напруги та конфігурації мереж, визначення черговості спорудження об'єктів. Під час оптимізації вибираються напруга й конфігурація мереж, встановлюється черговість спорудження об'єктів енергосистем.

Розглянута задача розв'язується за заданого плану вводу генерувальних потужностей. Основні дані для оптимізації — рівні навантажень вузлів електричної мережі на різних етапах її розвитку; розрахункова схема електричної мережі, що включає в себе наявні й намічені до спорудження лінії електропередачі й підстанції; технічні характеристики й вартісні показники елементів мережі

Метою роботи є розробка методів та алгоритмів оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем, що забезпечують ефективне розв'язання поставленої задачі розвитку, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей.

Критерій оптимальності для оптимізації — це сума динамічних дисконтованих витрат по всіх елементах мереж. Для розв'язання повинні бути враховані динаміка розвитку мереж енергосистем, вимоги до надійності і якості енергопостачання, обмеження за пропускну здатністю ліній електропередачі й трансформаторних підстанцій.

Результати досліджень

Метод гілок і границь відноситься до групи так званих комбінаторних методів, використовуючи які, здійснюється направлений частковий перебір допустимих рішень [1]—[6]. Суть методу

полягає в розбиванні множини варіантів розвитку мережі на непересічні підмножини і послідовне виключення підмножин безперспективних розв'язків. При цьому кожній підмножині ставляться у відповідність зовнішні і внутрішні оцінки.

Зовнішня оцінка y_k^e — це число, що завжди менше нижньої границі зміни функції дисконтованих витрат для підмножини варіантів розвитку мережі e , отримане в результаті дроблення множини k

$$y_k^e \leq Z_k^e, \quad (1)$$

де Z_k^e — нижня границя зміни функції витрат.

Внутрішня оцінка X_k^e — це величина дисконтованих витрат для одного з можливих варіантів розвитку мережі підмножини e , що досить близька до нижньої границі зміни функції витрат Z_k^e .

Нехай існує множина варіантів розвитку розглянутої електричної мережі γ_k . Розіб'ємо цю множину на дві підмножини, що не перетинаються, γ_k^m , γ_k^e і для кожної з них визначимо внутрішні та зовнішні оцінки — x_k^m , x_k^e , y_k^m і y_k^e . Якщо справедлива умова

$$x_k^m < y_k^e, \quad (2)$$

то підмножина варіантів розвитку мережі γ_k^e явно неперспективна, тому що витрати на спорудження та експлуатацію одного з варіантів розвитку мережі підмножини γ_k^m виявилися менше нижньої границі функції дисконтованих витрат для підмножини γ_k^e . Далі знову виконується дроблення підмножини

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k - \gamma_k^e, \quad (3)$$

знову визначаються внутрішні та зовнішні оцінки підмножин, підмножина безперспективних варіантів і т. д.

Як критерій оптимальності, для розв'язання задачі оптимізації розвитку електричної мережі, використовують суму динамічних дисконтованих витрат по всіх елементах (гілках) мережі

$$Z^c = \sum_{i \in M} Z_i, \quad (4)$$

де i — поточний індекс гілок мережі; M — множина допустимих гілок. Задача розв'язується за наявності обмежень

$$\sum_{i \in M_j} P_i - P_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J - 1, \quad (5)$$

де M_j — множина гілок, з'єднаних з вузлом j ; J — кількість пунктів мережі.

У складі елементів мережі розрізняють лінії електропередачі й трансформатори. Кожний елемент характеризується низкою параметрів, серед яких можуть бути, наприклад, напруга, перетин і число ланцюгів лінії, потужність трансформатора тощо. Зазначені параметри дискретні, що викликає істотні ускладнення під час розв'язання задачі оптимізації. Позаяк ці параметри можна представити функціями потоку потужності по лінії електропередачі або трансформатору, при оптимізації, для скорочення розмірності розв'язуваної задачі, доцільно виключити їх з числа незалежних змінних. Для побудови функцій дисконтованих витрат елементів мережі може бути застосований метод економічних інтервалів, за використання якого дисконтовані витрати i -ї гілки електричної мережі за будь-якого значення потоку потужності P_i по елементу повинні задовольняти умові [2], [3]

$$Z_i(P_i) = \min \{Z_{i1}(P_i), Z_{i2}(P_i), \dots, Z_{iV}(P_i)\}, \quad (6)$$

де V — загальна кількість варіантів технічного виконання i -ї гілки.

Функції $Z_{i1}(P_i)$, $Z_{i2}(P_i)$, ..., $Z_{iV}(P_i)$ можуть бути представлені у вигляді парабол та записані для всіх $v = 1, 2, 3, \dots, V$ допустимих перерізів ліній заданого типу і напруги або потужностей трансформаторів. Тоді у відповідності з (6) функція оптимальних витрат в лінію або трансформатор від потужності представляє собою нижню обвідну сім'ю парабол, кожна з яких побудована для одного з допустимих варіантів спорудження елемента мережі. Під час побудови функції оптимальних

витрат відповідають ті з допустимих варіантів, які не задовольняють умові (6).

Позаяк кількість можливих варіантів розвитку електричної мережі є кінцеве число, то після виконання певної кількості кроків дроблення множини γ_k сукупність варіантів розвитку, що залишилися, виявиться настільки малою, що може бути визначена точна нижня границя зміни функції дисконтованих витрат кожної з підмножин, що залишилися, Z_k^i . Той варіант розвитку мережі, що відповідає меншій з нижніх границь, і є оптимальним.

Введемо позначення

$$y_1 = \min_{i \in \alpha} \sum a_i; \quad y_2 = \min_{i \in \alpha} \sum b_i |P_i|. \quad (7)$$

Тоді, як зовнішню оцінку, можна вибрати величину

$$y = y_1 + y_2 \leq Z_k^i. \quad (8)$$

Слід зазначити, що перша складова відповідає найкоротшій електричній мережі, а друга є мережею, отриманою в результаті розв'язання в межах розглянутої підмножини транспортної задачі з проміжними перевезеннями.

Найкоротша електрична мережа, тобто мережа, для якої значення величини $\sum_{i \in \alpha} a_i$ мінімальне, може бути отримана з мережі, що містить всі можливі лінії, у результаті послідовного викреслювання ліній з найбільшим значенням величин a_i . При цьому не повинна бути порушена зв'язність схеми. Процес викреслювання гілок триває доки не буде отримана розімкнута мережа, що з'єднує всі пункти схеми.

В якості внутрішньої оцінки підмножини можна вибрати величину дисконтованих витрат варіанта розвитку електричної мережі, що відповідає або найкоротшій електричній мережі, або мережі, отриманій у результаті розв'язання транспортної задачі. Крім того, величину x_k^i можна визначити з умови

$$x_k^i = \min \{3(y_1), 3(y_2)\}. \quad (9)$$

Розв'язуючи задачу вибору оптимального варіанта розвитку мережі, дроблення підмножин здійснюється за ознакою наявності або відсутності в розглянутій підмножині тієї або іншої гілки. При цьому підмножина варіантів, що містять гілку i , позначається $\gamma(i)$, а підмножина варіантів без гілки i позначається $\gamma(\bar{i})$.

Кількість аналізованих варіантів розвитку мережі може виявитися настільки великою, що отримання точного розв'язку буде ускладнено навіть за використання сучасних комп'ютерів. Тому доцільно ввести критерій примусового закінчення оптимізації. Природно, що в цьому випадку буде отримано вже не точний, а наближений розв'язок. Як такий критерій можна використовувати величину

$$\delta = x_{k \min} - y_{k \min}, \quad (10)$$

де $x_{k \min}$ — мінімальна внутрішня оцінка підмножин, отриманих у результаті дроблення множини k ; $y_{k \min}$ — мінімальна зовнішня оцінка. Процес оптимізації вважається закінченим, якщо буде справедлива нерівність $\delta \leq \varepsilon$.

Алгоритм оптимізації розвитку електричної мережі методом гілок і границь може бути записаний так:

1. Розглядаючи множини всіх можливих варіантів розвитку електричної мережі γ , визначаємо найкоротшу електричну мережу, для якої значення величини $\sum_{i \in \alpha} a_i$ мінімальне. Визначаємо величину

$$y_1 = \sum_{i \in \alpha} a_i$$

для цієї мережі і дисконтовані витрати на її спорудження та експлуатацію x_1 .

2. Розв'язуємо транспортну задачу з проміжним перевезеннями для мережі, що містить всі допустимі лінії зв'язку. Для оптимальної електричної мережі знаходимо величину

$$y_2 = \sum_{i \in \alpha} b_i |P_i|.$$

і дисконтовані витрати на її спорудження та експлуатацію x_2 .

3. Знаходимо внутрішню та зовнішню оцінки розглянутої множини варіантів розвитку електричної мережі

$$y_0 = y_1 + y_2; \quad x_0 = \min\{x_1, x_2\}$$

і приймаємо множину γ_0 за вихідну множину аналізованих варіантів γ_k .

4. Вибираємо чергову лінію i , наявність або відсутність якої — ознака дроблення множини варіантів розвитку мережі γ_k . Розбиваємо множину γ_k на дві підмножини

$$\gamma_k = \gamma_k(i) + \gamma_k(\bar{i}).$$

5. Визначаємо зовнішні та внутрішні оцінки для підмножини варіантів розвитку мережі $\gamma_k(i)$, в якій є лінія i , і підмножини $\gamma_k(\bar{i})$, в якій ця лінія відсутня: $y_k(i)$, $x_k(i)$, $y_k(\bar{i})$, $x_k(\bar{i})$.

6. Якщо справедлива нерівність

$$x_k(i) < y_k(\bar{i}),$$

то відкидається підмножина варіантів розвитку, в якій відсутня гілка i

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k - \gamma_k(\bar{i}).$$

Якщо справедлива нерівність

$$x_k(\bar{i}) < y_k(i),$$

то відкидається підмножина γ_{k+1}

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k - \gamma_k(i).$$

7. Чи можна в отриманій підмножині γ_{k+1} визначити точну нижню границю зміни дисконтованих витрат Z_{k+1} ? Якщо так, то приймаємо варіант розвитку електричної мережі, що відповідає Z_{k+1} , як оптимальний та переходимо до п. 8 алгоритму. Якщо ні, то змінюємо номер кроку оптимізації $k = k + 1$ та переходимо до п. 4 алгоритму.

8. Кінець.

Для визначення зовнішніх і внутрішніх оцінок на кожному кроці оптимізації у п. 5 алгоритму повинні бути знайдені найкоротші електричні мережі та розв'язані транспортні задачі з проміжними перевезеннями для підмножин варіантів розвитку електричної мережі $\gamma_k(i)$ та $\gamma_k(\bar{i})$.

Обговорення отриманих результатів

Необхідно зазначити, що оскільки кількість дроблень підмножин залежить від порядку розгляду допустимих гілок електричної мережі, то ефективність використання методу гілок і границь істотною мірою залежить від ефективності алгоритму вибору гілки i на кожному кроці оптимізації.

У зв'язку з тим, що, використовуючи метод гілок і границь, на кожному кроці оптимізації необхідно визначати найкоротшу електричну мережу і розв'язувати транспортну задачу з проміжними перевезеннями, а зі збільшенням обсягу електричної мережі різко зростає кількість необхідних обчислень і аналізованих схем, все це ускладнює поширення методу.

Висновки

Методи та алгоритми оптимізації розвитку електричних мереж великих енергосистем, що використовують метод гілок і границь, забезпечують ефективне розв'язання задачі оптимізації, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей.

Розглянутий алгоритм оптимізації розвитку електричних мереж великих енергосистем реалізований у пакеті прикладних програм для персональних комп'ютерів. Розрахунки показали, що запропонований метод оптимізації відрізняється високою збіжністю, досить стійкий до вибору початкових наближень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. А. Баженов, *Моделі оптимального розвитку енергосистем*, учеб. пос. Київ: КПИ, 1984, 100 с.
- [2] В. А. Баженов, «Використання методів лінійного програмування для оптимізації розвитку електричних мереж сучасних енергосистем,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 93-97, 2016.
- [3] Т. Л. Кацадзе, В. А. Сулейманов, і В. А. Баженов, «Моделі та методи оптимізації розвитку основних мереж енергосистем в умовах ринкових відносин,» *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 4, с. 58-66, 2014.
- [4] В. Г. Кузнецов, Б. И. Тугай, и В. А. Баженов, *Оптимизация режимов электрических сетей*. Київ: Наукова думка, 1992, 216 с.
- [5] Д. А. Арзамасцев, А. В. Липес, и А. Л. Мизин, *Моделі оптимізації розвитку енергосистем*, учебн. для електроенергет. спец. вузов, Д. А. Арзамасцев. Ред. М.: Высш. школа, 1987, 272с.
- [6] Д. Химмельблау, *Прикладное нелинейное программирование*. Москва: Мир, 1975, 534 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021

Баженов Володимир Андрійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних мереж та систем, e-mail: v_bazhenov@ukr.net .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

V. A. Bazhenov¹

Use of the Method of Branches and Boundaries to Optimize the Development of Electrical Networks of Complex Energy Systems

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

The issues of development and use of methods and algorithms for optimizing the development of electrical networks of power systems that provide an effective solution to the problem of development, implementation of technical and resource constraints in the form of equalities and inequalities are considered. The essence of the proposed method of branches and boundaries is to break down the set of options for network development into disparate subsets and the consistent exclusion of subsets of unpromising solutions. Thus, to each subset external and internal estimations are put in accordance. At the decision of a problem of a choice of an optimum variant of development of a network of fragmentation of subsets is carried out on a sign of presence or absence in the considered subset of this or that branch. To determine the external and internal estimates at each optimization step, the shortest electrical networks must be found and the transport problems with intermediate traffic for the subsets of comparable electrical network development options must be solved. It should be noted that since the number of subset fractions depends on the order of consideration of acceptable branches of the electrical network, the efficiency of using the method of branches and boundaries depends significantly on the efficiency of the branch selection algorithm at each optimization step. Since the number of possible options for the development of the electrical network is a finite number, after performing a number of steps of fragmentation of the set of remaining options, the development will be so small that the exact lower limit of change in the cost function of each of the remaining subsets can be determined. The variant of network development that corresponds to the smaller of the lower limits is optimal. The proposed algorithm, which uses the method of branches and boundaries, has a fairly high level of convergence, resistance to the choice of initial approximations.

Keywords: electric network, power system, optimization of functioning, technical and resource constraints, network elements.

Bazhenov Volodymyr A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Networks and Systems, e-mail: v_bazhenov@ukr.net

Использование метода ветвей и границ для оптимизации развития электрических сетей сложных энергосистем

¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Рассмотрены вопросы разработки и использования методов и алгоритмов оптимизации развития электрических сетей энергосистем, которые обеспечивают эффективное решение поставленной задачи развития, выполнение технических и ресурсных ограничений в виде равенств и неравенств. Сущность предложенного метода ветвей и границ состоит в разбивке множества вариантов развития сети на непересекающиеся подмножества и последовательном исключении подмножеств неперспективных решений. При этом каждому подмножеству ставятся в соответствие внешние и внутренние оценки. При решении задачи выбора оптимального варианта развития сети дробление подмножеств осуществляется по признаку наличия или отсутствия в рассмотренном подмножестве той или иной ветви. Для определения внешних и внутренних оценок на каждом шаге оптимизации должны быть найдены кратчайшая электрическая сеть и решена транспортная задача с промежуточными перевозками для подмножеств сравниваемых вариантов развития электрической сети. Необходимо отметить, что количество дроблений подмножеств зависит от порядка рассмотрения допустимых ветвей электрической сети, поэтому эффективность использования метода ветвей и границ существенно зависит от эффективности алгоритма выбора контрольной ветви на каждом шаге оптимизации. Так как количество возможных вариантов развития электрической сети это конечное число, то после выполнения определенного количества шагов дробления множества совокупность оставшихся вариантов развития окажется настолько малой, что может быть определена точная нижняя граница изменения функции затрат каждого из оставшихся подмножеств. Тот вариант развития сети, который отвечает меньшей из нижних границ, и есть оптимальным. Предложенный алгоритм, использующий метод ветвей и границ, имеет довольно высокий уровень сходимости, устойчивость к выбору начальных приближений.

Ключевые слова: электрическая сеть, энергосистема, оптимизация функционирования, технические и ресурсные ограничения, элементы сети.

Баженов Владимир Андреевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических сетей и систем, e-mail: v_bazenov@ukr.net