

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Розглянуті питання розробки методів та алгоритмів оптимізації розвитку електричних мереж сучасних енергосистем, що забезпечують ефективний розв'язок поставленої задачі розвитку, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей. Запропонований алгоритм вибору оптимальної конфігурації електричних мереж, який використовує метод економічних потенціалів, має досить високий рівень збіжності, стійкість до вибору початкових наближень.

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

Вступ

Для керування розвитком електричних мереж енергосистем вибирають напругу і конфігурацію мереж, встановлюють черговість спорудження електромережеских об'єктів. Суму динамічних дисконтованих витрат по всіх елементах мережі використовують як критерій оптимальності. Для вирішення цього завдання мають бути враховані динаміка розвитку мереж енергосистем, вимоги до надійності і якості енергопостачання, обмеження за пропускною здатністю ліній електропередачі і трансформаторних підстанцій [1—6].

Задачу, що розглядається, розв'язують для заданого плану вводу генерувальних потужностей. Основні дані оптимізації — рівні навантажень електричної мережі на різних етапах її розвитку; розрахункова схема електричної мережі, яка включає в себе наявні і намічені до спорудження лінії електропередачі та підстанції; технічні і економічні характеристики елементів мережі.

В методах і алгоритмах оптимізації керування розвитком електричних мереж надійність енергопостачання вузлів навантаження враховують зазвичай введенням додаткових вимог до конфігурації мережі. Для обліку надійності енергопостачання певних вузлів оптимальну мережу будують таким чином, щоб кількість ліній, які живлять кожний з розглянутих вузлів, була не меншою від заданої. Крім цього, надійність може бути врахована в результаті включення до складу цільової функції збитку від недостатньої надійності енергопостачання або в результаті розрахунку і порівняння показників надійності з нормованими величинами. Однак, через те, що на сьогодні немає досить простих способів визначення збитку в складних енергосистемах і відсутні затверджені нормативи надійності, такі підходи до обліку надійності не отримали достатнього розповсюдження [7, 9].

Метою роботи є розробка методів та алгоритмів оптимізації розвитку електричних мереж сучасних енергосистем, що забезпечують ефективне розв'язання поставленої задачі розвитку, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей. Під час оптимізації розвитку вибираються напруга й конфігурація електричних мереж, встановлюється черговість спорудження об'єктів енергосистем.

Матеріал і результати досліджень

Розглянемо класичну постановку задачі оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем. Нехай задані місця розташування електростанцій, кожна з яких генерує потужність a_i , де $i = 1, 2, \dots, I$. Крім того, задані навантажувальні пункти, потреба в потужності яких становить b_j , де $j = 1, 2, \dots, J$. Функція дисконтованих витрат на транспорт енергії від електростанцій до споживачів може бути записана у вигляді

$$Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

де C_{ij} — питома вартість транспорту енергії від i -ї електростанції до j -го споживача; x_{ij} — потужність, що передається від i -ї електростанції до j -го споживача. Задача розв'язується за наявності обмежень по балансу потужності у вузлах

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad \sum_{i=1}^I x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (2)$$

Для побудови функцій дисконтованих витрат елементів мережі, серед яких розрізняють лінії електропередачі і трансформатори, може бути застосований метод економічних інтервалів [1], у разі використання якого дисконтовані витрати i -ї гілки електричної мережі за будь-якого значення потоку потужності P_i по елементу повинні задовольняти умову

$$Z_i(P_i) = \min \{Z_{i1}(P_i), Z_{i2}(P_i), \dots, Z_{iv}(P_i)\}, \quad (3)$$

де v — загальна кількість варіантів технічного виконання i -ї гілки [4].

Функції $Z_{i1}(P_i), Z_{i2}(P_i), \dots, Z_{iv}(P_i)$ 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 до (3) функція оптимальних витрат в лінію або трансформатор від потужності представляє собою нижню огинальну сім'ю парабол, кожна із яких побудована для одного з допустимих варіантів спорудження елемента мережі. Під час побудови функції оптимальних витрат відпадають ті із допустимих варіантів, в яких не виконується умова (3). Для існуючих ліній електропередачі постійна частина витрат в процесі оптимізації не змінюється і може бути виключена з цільової функції. Функція витрат в лінію в цьому випадку проходить через початок координат.

Аргумент функції оптимальних дисконтованих витрат — потужність лінії, тому використання цієї функції при оптимізації розвитку мережі дозволяє виключити переріз лінії з числа незалежних змінних. В цьому випадку переріз може бути визначений за заданою потужністю за допомогою економічних інтервалів. Аналогічно виключається зі складу незалежних змінних число паралельних ланцюгів лінії електропередачі, потужність та кількість трансформаторів.

Безпосереднє використання функції оптимальних дисконтованих витрат ускладнюється через те, що на межі економічних інтервалів розірвані перші похідні. Через це кусково-параболічну функцію витрат замінюють простішими апроксимуючими функціями. Для апроксимації може бути використаний метод найменших квадратів [2, 5], що дозволяє на основі таблиці значень функції (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, N$) визначити багаточлен ступеня $M < N$.

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_Kx^K + \dots + a_Mx^M, \quad (4)$$

що досить близько описує таку функцію. Метод найменших квадратів дозволяє вибрати такий багаточлен, що мінімізує функцію

$$\sum_{i=1}^N (y_i - y(x_i))^2 = f(a_0, a_1, \dots, a_M). \quad (5)$$

За використання для оптимізації розвитку методів лінійного програмування функцію витрат у кожну гілку мережі апроксимують прямою лінією [1, 2, 9].

Для розв'язку транспортної задачі з проміжними перевезеннями може бути використаний метод економічних потенціалів, сутність якого полягає в такому [2, 9].

Зі складу вихідної розрахункової схеми мережі, яка поєднує всі припустимі гілки, виділяють розімкнуту частину — дерево мережі. При цьому повинна бути забезпечена зв'язність усіх вузлів схеми. Потенціал балансуємого пункту беруть рівним нулю. Економічні потенціали вузлів початку й кінця кожної гілки зв'язані між собою виразом

$$\pi_j = \pi_i + C_{ij}, \quad (6)$$

де i, j — поточні індекси вузлів, відповідно, початку й кінця гілок мережі. В (6) напрямом гілки ij взятий збіжним з напрямом потоку потужності.

У заданій розрахунковій схемі електричної мережі вибирають опорний (балансуючий) пункт, який умовно виконує роль джерела живлення. Всі інші пункти умовно відіграють роль навантажень. Ділянки розрахункової схеми поділяються на гілки дерева, що зв'язують опорний пункт зі

всіма іншими пунктами, і перемички, які замикають контури схеми. Дерево повинно бути повністю розімкненим; за підключення всіх перемичок схема перетворюється на вихідну.

Алгоритм розрахунку передбачає компактне зберігання конфігураційної моделі мережі. Порівняно з класичними матрицями інцидентів набагато ефективнішими виявилися так звані адресні моделі [2, 6]. Адресна модель електричної мережі складається з посилань, що дозволяють оперативно «переключати увагу» програми від гілки схеми до ідентичного їй вузла, і навпаки. При побудові адресних посилань у процесі автоматичного сортування інформації вихідна конфігураційна модель перетворюється в асоціативну, що суттєво спрощує процедуру пошуку і скорочує час розрахунку. Оскільки реалізація адресної моделі потребує додаткового часу, це є виправданим тільки для багаторазово повторюваних розрахунків (ітераційних і оптимізаційних). Конкретний склад адресної моделі визначається специфікою розв'язуваної задачі.

В процесі оптимізації розвитку задача розрахунку потужностей гілок ефективно розв'язується за допомогою евристичного алгоритму, що моделює для кожної із зон розрахункової схеми один з напрямків причинно-наслідкових впливів: передачу потенціалів від балансуючого до навантажувальних пунктів. Потенціали всіх вузлів мережі можуть бути знайдені у разі послідовного розгляду гілок розімкнутої мережі в напрямку від балансуючого пункту до меж дерева. Далі знаходять різниці економічних потенціалів εU_{ke} для припустимих гілок мережі, які не були включені до складу дерева

$$\varepsilon U_{ke} = \pi_e - \pi_k. \quad (7)$$

Якщо для всіх гілок виконується умова $|\varepsilon U_{ke}| < C_{ke}$, то оптимальний план знайдений; якщо ні — включають гілку ke , для якої умова не виконується, до складу дерева мережі. У свою чергу з дерева виключають лінію, якій відповідає найменше значення потоку потужності на шляху з пункту k в пункт e . Далі знову знаходять економічні потенціали вузлів мережі, різниця потенціалів для невиключених у дерево гілок мережі, порівнюють отримані різниці з вартістю передачі одиничної потужності і т. д.

Алгоритм методу економічних потенціалів може бути записаний у вигляді .

1. Зі складу вихідної розрахункової схеми виділяють розімкнуту частину мережі, яка забезпечує зв'язність усіх вузлів. Беруть $V = 0$.

2. Потенціал балансуючого пункту беруть рівним нулю $\pi_{bn} = 0$.

3. Організують послідовний перегляд вузлів мережі в напрямку — від балансуючого пункту до меж дерева. При цьому з виразу

$$\pi_j^{(V)} = \pi_i^{(V)}(\gamma(\alpha)) + C_{ij}(\alpha) \quad (8)$$

знаходять потенціали всіх вузлів мережі. В (8) α — адресне посилання «вузол—гілка, що живить цей вузол через дерево схеми»; γ — адресне посилання «гілка—вузол, в якому починається гілка, що розглядається».

4. Якщо для різниці потенціалів вузлів початку й кінця гілок мережі, які не були включені до складу дерева, виконується умова

$$|\varepsilon U_{ke}^{(V)}| = |\pi_e^{(V)} - \pi_k^{(V)}| < C_{ke}, \quad (9)$$

то оптимальний план знайдений і переходять до п. 5 алгоритму, якщо ні, то переходять до п. 4.

5. Включають до складу дерева мережі гілку, що має найменше значення коефіцієнта вигляду

$$\bar{C}_{ke}^{(V)} = C_{ke} - \pi_e^{(V)} + \pi_k^{(V)}. \quad (10)$$

З дерева виключають лінію, якій відповідає найменше значення потоку потужності на шляху між пунктами початку й кінця гілки, включеної в дерево. Змінюють номер кроку оптимізації $V = V + 1$ й переходять до п. 2 алгоритму.

6. Кінець.

Висновки

Запропонований алгоритм вибору оптимальної конфігурації електричних мереж енергосистем, який використовує метод економічних потенціалів і має досить високий рівень збіжності, стійкість до вибору початкових наближень.

Алгоритм розрахунку передбачає використання конфігураційної моделі мережі у вигляді адресної моделі. Адресна модель електричної мережі складається з послань, що дозволяють оперативно «переключати увагу» алгоритму від гілки схеми до належного їй вузла, і навпаки. Конкретний склад адресної моделі визначається специфікою розв'язуваної задачі.

Під час оптимізації задача розрахунку економічних потенціалів ефективно розв'язується за допомогою евристичного алгоритму, який моделює для кожної із зон розрахункової схеми один з напрямків причинно-наслідкових впливів: передачу потенціалів від балансуємого до навантажувальних пунктів.

Всі запропоновані алгоритми можуть бути досить просто реалізовані в пакеті прикладних програм для персональних комп'ютерів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Арзамасцев Д. А. Модели оптимизации развития энергосистем : учебн. пос. / Д. А. Арзамасцев, А. В. Липес, А. Л. Мизин. — М. : Высш. школа, 1987. — 272 с.
2. Баженов В. А. Модели оптимального развития энергосистем : учеб. пос. / В. А. Баженов. — К. : КПИ, 1984. — 100 с.
3. Баженов В. А. Моделирование электрической сети при оптимизации развития энергосистем / В. А. Баженов // *Технічна електродинаміка : тематичний вип. «Проблеми сучасної електротехніки»*. Частина 5. — К. : Ін-т електродинаміки НАН України. — 2006. — С. 9—12.
4. Дале В. А. Динамическое программирование в расчетах развития сетей энергосистем : моногр. / В. А. Дале, З. П. Кришан, О. Г. Паэгле. — Рига : Зинатне, 1979. — 260 с.
5. Кацадзе Т. Л. Моделі та методи оптимізації розвитку основних мереж енергосистем в умовах ринкових відносин / Т. Л. Кацадзе, В. Н. Сулейманов, В. А. Баженов // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. — 2014. — № 4. — С. 58—66.
6. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов. — К. : Наукова думка, 1992. — 216 с.
7. Моцкус Н. Б. О покоординатном методе оптимизации развития электрических сетей / Н. Б. Моцкус // *Изв. АН УССР. Энергетика и транспорт*. — 1969. — Т. 1. — С. 46—53.
8. Моцкус И. Б. Многоэкстремальные задачи в проектировании / И. Б. Моцкус. — М. : Наука, 1967. — 315 с.
9. Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике / О. В. Щербачев, А. Н. Зейлигер, К. П. Кадомская и др. — Л. : Энергия, 1980. — 240 с.
10. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. — М. : Мир, 1975. — 534 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 11.01.2016

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

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут», Київ

V. A. Bazhenov¹

Using Linear Programming Methods for Development Optimization of Electric Networks of Modern Power Supply Systems

¹National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

The paper explores the questions of the development of methods and algorithms for optimization of electric networks of modern power supply systems that provide effective solutions to the task of development, implementation and technical resource constraints as equalities and inequalities. The algorithm for selecting the optimal configuration of electrical networks that uses methods of economic potentials, has a very high level of convergence and is stable to the choice of initial approximations has been proposed.

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

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

В. А. Баженов¹

Использование методов линейного программирования для оптимизации развития электрических сетей современных энергосистем

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Рассмотрены вопросы разработки методов и алгоритмов оптимизации развития электрических сетей современных энергосистем, которые обеспечивают эффективное решение поставленной задачи развития, выполнение технических и ресурсных ограничений в виде равенств и не равенств. Предложен алгоритм выбора оптимальной конфигурации электрических сетей, который использует метод экономических потенциалов, имеет достаточно высокий уровень сходимости, устойчив к выбору начальных приближений.

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

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