

Бакалавр Козій В.В., доцент, к.т.н. Баженов В.А.

*Національний технічний університет України “Київський політехнічний
Інститут імені Ігоря Сікорського”*

Вибір оптимального варіанта замкненої електричної мережі методом поконтурної оптимізації

Метод поконтурної оптимізації можна використовувати для розв’язання задачі визначення оптимальної конфігурації проектованої мережі як у статичній, так і в динамічній постановці [2, 10]. Модифікацію методу, призначену для розв’язання динамічної задачі оптимізації розвитку електричної мережі, реалізовано в комплексі програм для ЕОМ другого покоління, розробленому в Інституті фізико-технічних проблем енергетики АН колишньої Литовської РСР.

Розглянутий метод належить до групи методів покоординатної оптимізації, сутність яких полягає в такому. Нехай визначено n одиничних векторів напрямів координат $e_1, e_2, \dots, e_n$. Метод циклічного покоординатного спуску працює по черзі в кожному координатному напрямі. Якщо дано точку $X^{(0)}$, то точка $X^{(1)}$ утворюється з $X^{(0)}$ мінімізацією цільової функції в напрямку e_1 , точка $X^{(2)}$ з $X^{(1)}$ мінімізацією в напрямку e_2 і т. д. Нарешті точку $X^{(n)}$ знаходять мінімізацією в напрямку e_n . Потім усі операції повторюють, починаючи з точки $X^{(n)}$ і т. д. Якщо після циклу оптимізації по усіх координатах виконується умова

$$|\Phi(X^{(n)}) - \Phi(X^{(0)})| < \varepsilon, \quad (1)$$

то процес пошуку вважають закінченим. В умові (4.1) $\Phi(X^{(0)})$ і $\Phi(X^{(n)})$ – значення цільової функції в початковій $X^{(0)}$ і кінцевій $X^{(n)}$ точках циклу оптимізації; ε – точність розрахунку.

Мінімізацію в напрямі по одній координатній осі зазвичай виконують або методом прямого пошуку, у якому варіюється координата точки X , яка послідовно набуває можливих дискретних значень, або одним з методів одновимірного пошуку.

Якщо змінювання змінних обмежене системою рівнянь, то частина змінних, кількість яких дорівнює кількості рівнянь зв’язку, виявляються залежними. Інші змінні є незалежними. У цьому випадку покоординатний спуск виконують тільки за незалежними змінними. У процесі пошуку оптимального розв’язку деякі з незалежних змінних можна зводити до залежних, а таку саму кількість залежних – до незалежних.

При використанні метода поконтурної оптимізації, задачу вибору оптимальної конфігурації електричної мережі в статичній постановці формулюють як задачу визначення мінімуму функції витрат вигляду

$$V^* = \sum_{i \in M} V_i(P_i) \quad (2)$$

за умови, що

$$\sum_{i \in M_j} P_i - P_j = 0, j = 1, 2, \dots, J - 1, \quad (3)$$

де i – поточний індекс гілок електричної мережі; M – множина допустимих гілок мережі; $V_i(P_i)$ – відома кусково-лінійна функція витрат на i -у лінію, яку можна одержати в результаті апроксимації кривої економічних інтервалів; M_j – множина гілок, з'єднаних з вузлом j ; P_i – потужність, що перетікає по лінії i ; P_j – навантаження j -го вузла; J – кількість вузлів у мережі. При цьому потужність балансувального вузла визначають із виразу

$$P_J = - \sum_{i \in M_J} P_i.$$

Для спрощення обчислень на кожному кроці оптимізації доцільно апроксимувати функцію витрат на кожному гілку мережі прямою лінією [2, 19]. Тоді функцію $V_i(P_i)$ записують у вигляді

$$V_i(P_i) = \begin{cases} a_i + b_i |P_i|, & \text{якщо } P_i \neq 0; \\ 0, & \text{якщо } P_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

для кожної нової гілки;

$$V_i(P_i) = b_i |P_i| \quad (5)$$

для кожної існуючої гілки мережі.

Використовуючи метод поконтурної оптимізації, в розрахунковій схемі виділяють зв'язну розімкнуту мережу, яку називають деревом мережі. Усі гілки мережі називають дугами. Дуги, що утворюють дерево, позначають індексами $l = 1, 2, \dots, L$. Дуги, що не входять у дерево, і вмикання яких забезпечує перехід до вихідної замкнутої мережі, називають хордами. Хорди позначають індексами $k = 1, 2, \dots, K$. У результаті додавання будь-якої з хорд до дерева мережі утвориться контур. Як незалежні змінні використовують навантаження хорд мережі, а як залежні – навантаження дуг, що утворюють дерево мережі. Кількість незалежних змінних, що дорівнює кількості незалежних контурів, можна визначити за допомогою виразу $K = I - J + 1$, де I – кількість гілок мережі. Кількість залежних змінних дорівнює кількості рівнянь зв'язку $j - 1$.

Нехай навантаження всіх хорд дорівнюють нулю, тоді, змінюючи потужність, наприклад k -ї хорди, можна визначити мінімум функції витрат на спорудження й експлуатацію гілок даного контуру:

$$V_k^*(P_k) = V_k(P_k) + \sum_{l \in M_k} V_l(P_l), \quad (6)$$

де P_k і $V_k(P_k)$ – відповідно навантаження і витрати k -ї хорди; M_k – множина дуг контуру, що виникає у разі замикання k -ї хорди; P_l – навантаження l -ї дуги, яке, у свою чергу, залежить від потужності хорди $P_l = f_l(P_k)$.

Відомо, що для оптимізації у загальному випадку кусково-лінійної функції достатньо розглянути її критичні точки, тобто точки, в околі яких

функція не спадає. Оскільки в цьому випадку функції витрат у лінії, подані у вигляді (1.14) і (1.15), критичні точки відповідають нульовому навантаженню хорди або дуги контуру. У цьому разі для оптимізації контуру достатньо порівняти зведені витрати для тих його режимів, у яких навантаження хорди або однієї з дуг дорівнює нулю [2, 19].

Якби контури мережі не були взаємозалежні, оптимізація була б закінчена за k кроків. Проте існують дуги, що одночасно входять у декілька контурів. Тому в результаті оптимізації одного контуру змінюються умови оптимізації інших контурів, що потребує їхнього повторного розгляду. Взаємовплив контурів потребує організації ітераційного процесу пошуку екстремуму. У процесі виділяють цикли оптимізації, послідовне виконання яких забезпечує розв'язання задачі. На кожному циклі здійснюють оптимізацію всіх контурів мережі.

Якщо результат оптимізації k -го контуру – нульове навантаження не хорди, а l -ї дуги, доцільно змінити систему незалежних змінних. При цьому k -у хорду потрібно включити в дерево мережі, а l -у дугу – до складу хорд. У протилежному випадку цю дугу при оптимізації одного контуру можна вважати замкнутою, а при оптимізації іншого – розімкнутою.

Алгоритм методу поконтурної оптимізації можна записати таким чином.

1. Виділяють дерево мережі. При цьому дуги, що утворюють дерево, позначають індексами $l = 1, 2, \dots$, а хорди – індексами $k = 1, 2, \dots$. Навантаження всіх хорд дорівнюють до нуля: $P_k = 0$, $k = 1, 2, \dots$. Задають $k = 1$.

2. Виконують оптимізацію k -го контуру. При цьому знаходять

$$V_k^*(P_{l'} = 0) = \min \{ V_k^*(P_l = 0) \mid l \in M_k \}. \quad (7)$$

Якщо $V_k^*(P_{l'} = 0) < V_k^*(P_k = 0)$, то для наступного кроку оптимізації дугу l' беруть як хорду, а k -у хорду включають у дерево мережі. У протилежному випадку система незалежних змінних залишається без зміни. Задають $P_k = 0$.

3. Якщо всі контури мережі $k = K$, то переходять до п. 4 алгоритму, якщо ні, то змінюють поточний індекс контуру $k = k + 1$ і переходять до п. 2.

4. Якщо в циклі процесу змінювали дерева і хорди мережі, то беруть $k = 1$ і переходять до п. 2 алгоритму, якщо ні – до п. 5.

5. Кінець.

У цьому алгоритмі критерій закінчення процесу оптимізації – сталість хорд і дерева мережі після виконання циклу оптимізації. Крім того, в загальному випадку ітераційний процес можна закінчувати, якщо виконується умова

$$|V^{*(V-1)} - V^{*(V)}| \leq \varepsilon, \quad (8)$$

де V – номер циклу оптимізації.

Література:

1. Модели оптимального развития энергосистем / В.А. Баженов. Учеб. пособие. - Киев: КПИ, 1984. – 100 с.
www.neocarbonenergy.fi/wp-content/uploads/2016/02/3_Child.pdf.
2. Модели оптимизации развития энергосистем: Учебн. для электроэнергет. спец. вузов/ Д.А.Арзамасцев, А.В.Липес, А.Л.Мизин /Под ред. Д.А.Арзамасцева. -М.: Высш. школа., 1987. – 272с.
3. Сулейманов В.М. Розрахунок і регулювання усталених режимів роботи електричних мереж енергосистем. – Київ: НМК, 1992. – 207 с.
4. Электрические системы и сети./ Буслова Н.В., Винославский В.Н., Денисенко Г.И., Перхач В.С. – К.: Вища шк, 1986. – 584 с.