РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ, МЕРЕЖІ ТА КЕРУВАННЯ НИМИ

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Вдовин В.В., магістрант, Баженов В.А., к.т.н., доц.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем

Вступ. При оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем вибираються напруга й конфігурація мереж, встановлюється черговість спорудження об'єктів електромереж. Критерій оптимальності при оптимізації - це сума динамічних дисконтованих витрат по всіх елементах мереж. При рішенні повинні бути враховані динаміка розвитку мереж енергосистем, вимоги до надійності і якості енергопостачання, обмеження по пропускній здатності ліній електропередачі й трансформаторних підстанцій.

Мета роботи. Розробка алгоритмів оптимізації конфігурації електричних мереж, з урахуванням певних технічних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей..

Матеріали і результати досліджень. Розглянутий метод належить до групи методів покоординатної оптимізації, сутність яких полягає в наступному. Нехай визначено n одиничних векторів напрямів координат e_1, $e_2,\ldots,e_n$. Метод циклічного покоординатного спуску по черзі працює в кожному координатному напрямку. 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 всіх координатах виконується умова

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

то процес пошуку вважають закінченим. В умові (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.

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

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

за умови, що

$$\sum_{i\in M_j} P_i - P_j = 0,\ j = 1, 2, ..., J-1, \tag{3}$$

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 [1]. 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 кожну гілку мережі прямою лінією [1]. Тоді функцію $V_i(P_i)$ записують у вигляді

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

для кожної нової гілки;

$$V_i(P_i) = b_i \left| P_i \right| \tag{5}$$

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, …, L. Дуги, що не входять у дерево, і вмикання яких забезпечує перехід до вихідної замкнутої мережі, називають хордами. Хорди позначають індексами k=1, 2, …, 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 утворять 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-ої хорди, можна визначити мінімум функції витрат на спорудження й експлуатацію гілок даного контуру:

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

де P_k і $V_k(P_k)$ – відповідно навантаження і витрати k-ої 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 $P_l = f_l(P_l)$.

Для оптимізації контуру достатньо порівняти дисконтовані витрати для тих його режимів, у яких навантаження хорди або однієї з дуг дорівнює нулю. 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-ої дуги, доцільно змінити систему незалежних змінних. При цьому k-у хорду потрібно включити в дерево мережі, а l-у дугу – до складу хорд. У противному 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 утворять дерево, позначають індексами l=1, 2,…, L, а хорди – індексами k=1, 2,…, K. Навантаження всіх хорд дорівнюють до нуля: P_k=0, k=1, 2,…, K. Задають $k=1$.

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

$$V_k^*(P_{l'}=0)=\min\left\{V_k^*(P_l=0)\middle|\ l\in M_k\right\}.$$

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 противному 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

$$\left|V^{*(V-1)}-V^{*(V)}\right|\le\varepsilon,$$

де V – номер циклу оптимізації.

В роботі було виконано оптимізацію конфігурації електричної мережі, схема якої показана на рис. 1. В якості хорд вибрані лінії 1-2, 2-4, 4-6 та 6-7. Тоді перший контур утворять дуги БП-1, БП-2 і хорда 1-2, другий – дуги БП-2, БП-3, 3-4 та хорда 2-4, третій – дуги БП-3, 3-4, БП-5, 5-6 та хорда 4-6, четвертий – дуги А-5, 5-6, А-7 та хорда 6-7.

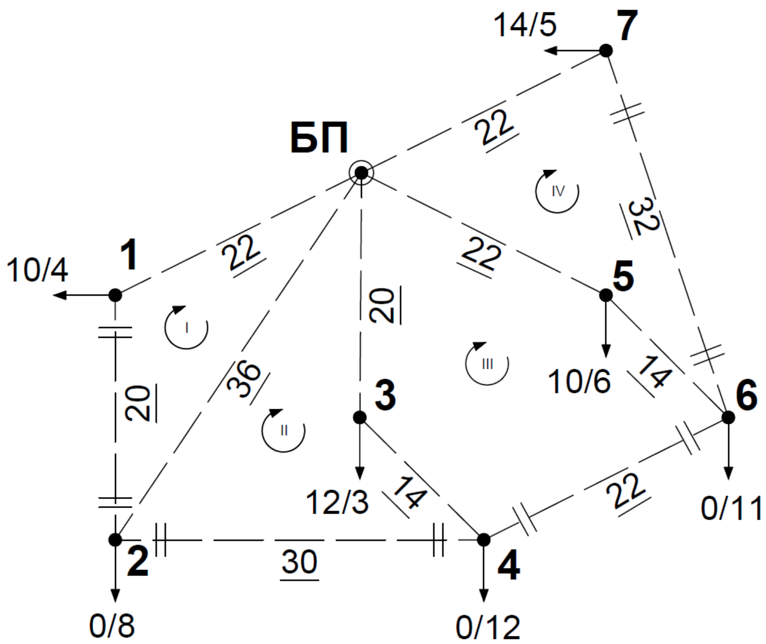

Рисунок 1 – Схема електричної мережі

На кожному кроці методу послідовно оптимізуємо кожний контур електричної мережі. Після другого кроку дерево і хорди мережі не змінили свого положення – отримана оптимальна конфігурація енергосистеми, яка показана на рис. 2.

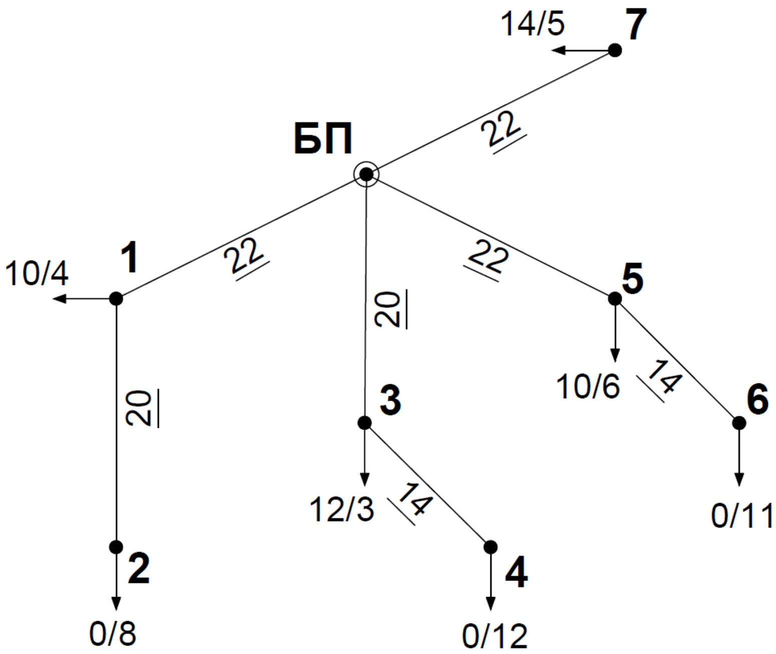

Рисунок 2 – Оптимальна конфігурація електричної мережі

Висновки. В результаті виконання роботи були запропоновані методи та алгоритми оптимізації розвитку енергосистем, які дозволяють отримати оптимальну конфігурацію електричних мереж. Алгоритми основані на використанні математичного методу поконтурної оптимізації.

Перелік посилань

1. Баженов В.А. Модели оптимального развития энергосистем: учеб.пособ. /В.А. Баженов. –К.:КПИ,1984. – 100 с.
2. Кузнецов В.Г. Оптимизация режимов электрических сетей/ В.Г. Кузнецов, Ю.И. Тугай, В.А. Баженов. – К.: Наукова думка, 1992. – 216 с.