

УДК 621.316

Добровенко Д.Ю.
Кафедра електропостачання
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИБОРУ МІСЦЬ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

***Анотація:** У даній роботі розглядається удосконалення процесу визначення координат оптимального розміщення джерел живлення в розподільних електричних мережах. Сформовано математичні моделі задач, для розв'язання яких було використано методи нелінійного програмування.*

***Ключові слова:** системи електропостачання, центр електричних навантажень, теорія прийняття рішень, оптимальність, допустимість, математичні моделі.*

***Abstract:** This paper considers the improvement of the process of determining the optimal coordinates of the location of power supplies for cable distribution networks. Mathematical models of these problems have been developed using nonlinear programming techniques.*

***Keywords:** power supply system, center of electric load, Decision theory, optimality, admissibility, mathematical models.*

Вступ. Одна з важливих задач проектування систем електропостачання (СЕР) споживачів електроенергії - задача вибору оптимального місця розташування живильних трансформаторних підстанцій або розподільних пунктів. Важливість задачі пояснюється тим, що від місця розташування джерел живлення (ДЖ) залежать техніко-економічні параметри десятків і сотень кабельних ліній розподільних електромереж, які прокладені від джерел живлення до споживачів електроенергії і несуть електричне навантаження цих споживачів. Від координат розміщення джерел живлення залежать такі показники розподільних мереж, як їх вартість, величина витрат на експлуатацію і, зокрема, вартість втрат електроенергії в лініях. Не дивно, що в останні десятиріччя задачі вибору оптимальних координат розміщення джерел живлення була присвячена значна кількість наукових робіт [1-6].

Мета та завдання дослідження. Формування математичних моделей з використанням методів нелінійного програмування в задачах оптимального вибору та керування системами розподілу електричної енергії. Дослідити, як будуть змінюватися техніко-економічні показники електричної мережі при зміні координат розміщення джерел живлення.

Матеріал та результат дослідження.

Перші методи визначення оптимальних координат розташування ДЖ [1,2] базувалися на понятті "центра електричних навантажень" (ЦЕН). Ці методи максимально орієнтовані на ручний спосіб розрахунку, тому були простими і не могли врахувати достатню кількість факторів, що впливають на вибір координат розміщення ДЖ. Така орієнтація методів спричинена тим, що на той час була недостатня доступність засобів обчислювальної техніки (ОТ) та необхідного для розрахунків математичного і програмного забезпечення для проектування СЕР. В роботах [3,4] було досліджено, що центр навантажень не мінімізує навіть моменту навантажень.

В роботі [5] було запропоновано один із перших методів визначення оптимальних координат розміщення ДЖ з використанням ОТ. За критерій оптимальності в даному методі прийнято мінімум річних приведених затрат. Недоліком даного методу є те, що показником ефективності розв'язку було обрано приведені затрати, визначені через питомі приведені

затрати ліній електропередачі, вони не враховували всіх складових витрат в мережу, що залежать від координат місць розміщення джерел живлення.

В роботах [3,4] було введено поняття центра мережі (ЦМ), як точки розміщення ДЖ, в якій було забезпечено мінімум функції приведених затрат мережі. В цих роботах вперше запропоновано визначення координат розміщення ДЖ виконувати в метричному просторі з неевклідовою метрикою, відстань між двома точками $a=(a_1;a_2)$ та $b=(b_1;b_2)$ в якому визначається за формулою

$$p(a,b) = |a_1 - a_2| + |b_1 - b_2| \quad (1)$$

Метрика виду (1) дозволяє більш адекватно врахувати геометрію реальної електричної мережі, коли лінії мережі прокладають уздовж прямокутних проїздів, створених технологічними та іншими будівлями промислового підприємства або міста. Це призводить до того, що функція приведених затрат стає негладкою. Тому найбільш розвинені та розповсюджені методи гладкої оптимізації не можуть гарантувати коректного розв'язання цієї задачі.

Сучасні універсальні широко розповсюджені системи автоматизованого проектування (САПР) дозволяють виконувати складні технічні, техніко-економічні та оптимізаційні розрахунки для широкого кола задач. В роботі [7] за допомогою таких САПР створено комп'ютерні моделі пошуку розв'язків цих задач, що значно прискорює отримання необхідних результатів та максимально спрощує процес впровадження розроблених моделей в практику проектування, завдяки широкому розповсюдженню сучасних універсальних обчислювальних систем.

Економічний аспект вибору перерізу провідників досі залишається предметом дискусій. Для економічних розрахунків в енергетиці, окрім критерію мінімуму дисконтованих затрат існує декілька інших критеріїв оптимальності. В даній роботі за критерій оптимальності вибору перерізів розподільних ліній 6-10 кВ прийнято мінімум *дисконтованих затрат (NPV)*, виходячи із положення нормативних документів [8,9], згідно з яким "критерій мінімуму дисконтованих затрат доцільно застосовувати у випадках, коли порівнюються варіанти технічного вирішення задачі, необхідність здійснення якої апріорно визначена, і не потрібна оцінка загальної ефективності інвестицій, при чому продукція, яка реалізується, у всіх варіантах однакова (за кількістю та режимом споживання)". Приклади розрахунку цього критерію було наведено у роботі [6].

В даній роботі розглядаються високовольтна (ВВ) та низьковольтна (НВ) мережі. Прийнято припущення, що все навантаження однорідне, що спрощує розрахункові моделі. Таким чином, в першій частині отримуємо розрахунки при повністю активному навантаженні, а потім порівнюємо з результатами другої моделі, де присутнє реактивне навантаження. В роботі розглядається двопробенева магістральна мережа. Дана мережа складається з житлового комплексу, живлення якого обслуговують n трансформаторних пунктів (ТП), кожен з яких живить m житлових будинків (ЕП) з потужністю P_{ij} та Q_{ij} . Відомі координати всіх ЕП $(x_{ij}; y_{ij})$ та джерела живлення (ДЖ) $(x_0; y_0)$. При проектуванні закладаємо кабель АВВГ $4 \times F_{l_{ij}}$.

Попереднім етапом для оптимізації в будь-якому з випадків є вибір мінімального перерізу КЛ, що живить кожний i -ий ТП. Тому наведемо вираз для розрахунку струму нормального режиму та перевірки кабелю обраного перерізу за струмом після аварійного режиму.

Струм у нормальному режимі

$$I_{l_{ij}} = \frac{S_{ij}}{2\sqrt{3}U_{\text{нн}}} \quad (2)$$

За даним струмом спочатку обираємо кабель $I_{\text{дон}} \geq I_{l_{ij}}$.

Потім виконуємо перевірку за струмом після аварійного режиму:

$$I_{l_{ij}} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{3}U_{\text{нн}}} \quad (3)$$

Кабель перевіряємо за умовою

$$K_{\text{нсп}} K_1 K_2 I_{\text{дон}} \geq I_{\text{н/ат.т.}} \quad (4)$$

де $K_{\text{нсп}}$ – коефіцієнт перевантаження кабелю, $K_{\text{нсп}} = 1,3$;

K_1 – коефіцієнт, що враховує температурні умови при прокладанні кабелю;

K_2 – коефіцієнт, що враховує кількість паралельно ввімкнених кабелів.

Якщо умови виконуються, то залишаємо вище обраний кабель, якщо ні – перевіряємо кабель наступного перерізу, доки не знайдемо такий, що буде задовольняти умові (4)

Приймаючи до уваги все вищеперераховане, отримаємо два пункти математичного аналізу для оптимізації заданої функції, кожен з яких буде складатися з двох підпунктів. Тому розглянемо ці пункти.

1. НВ мережа

На рисунку 1 зображено НВ мережу 0,4 кВ, що живить кожний i -ий ТП даного житлового комплексу. Від кожного i -го ТП живиться певна кількість m ЕП.

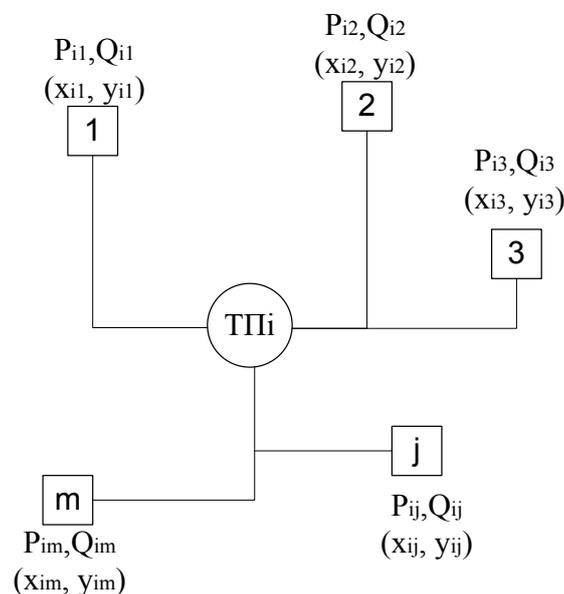


Рисунок 1 – План розташування ЕП, що живляться від кожного i -го ТП

1.1 Навантаження повністю активне

При цьому реактивне навантаження відсутнє, тобто, $S_{ij} = P_{ij}$, $\cos \varphi = 1$. В цьому випадку розрахунки значно спрощуються:

- капіталовкладення

Розмір необхідних капіталовкладень залежить від довжини КЛ (l_{ij}), переріз КЛ ($F_{l_{ij}}$), які впливають також на вартість монтажу КЛ. Отож отримаємо наступний вираз для кожного

i -го ТП

$$K_{\tau_i} = \sum_{j=1}^m l_{ij}(C_{l_{ij}} + M_{l_{ij}}),$$

де $C_{l_{ij}}$ - ціна КЛ l_{ij} обраного перерізу, грн/км;

$M_{l_{ij}}$ - вартість монтажу КЛ l_{ij} обраного перерізу, грн/км.

- Витрати на компенсацію втрат ЕЕ для кожного i -го ТП

$$B_{\varepsilon_i} = \frac{1}{4U_{\text{нн}}^2} \left(\sum_{j=1}^m P_{ij}^2 r_{0l_{ij}} l_{ij} \right) \tau_{\text{max}} C_0$$

де $r_{0l_{ij}}$ - активний погонний опір КЛ l_{ij} , що живить j -ий ЕП ТПі.

1.2 Навантаження активно-реактивне

При цьому у виразах для розрахунку капіталовкладень та витрат на компенсацію реактивної потужності під знаком квадратного кореня з'являються як активна, так і реактивна складові повної потужності P_{ij} та Q_{ij} , що ускладнює розрахунки.

2 ВВ мережа

На рисунку 2 зображено ВВ мережу 6-10 кВ, що живить даний житловий комплекс. Від ДЖ живляться n ТП.

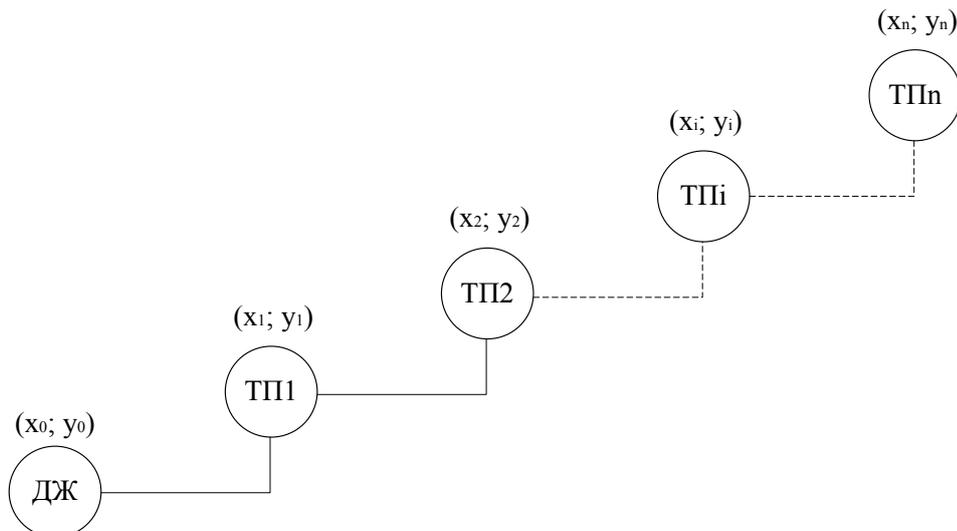


Рисунок 2 – План розташування ТП, що живляться від даного ДЖ

2.1 Навантаження повністю активне

Дана мережа виконана двопробевою магістральною лінією, тому розрахунки дуже ускладнюються, тепер враховуються не тільки навантаження ЕП даного ТП, але й усіх, що живляться через дане ТП, а також розташування сусідніх ТП.

При цьому $\cos \varphi = 1$ та у виразах для розрахунку капіталовкладень та витрат на компенсацію реактивної потужності під знаком квадратного кореня з'являються як активна, так і реактивна складові повної потужності P_{ij} та Q_{ij} , що ускладнює розрахунки.

До розрахунків попереднього розділу додаватимуться також навантаження на шини ВН ТП. Також необхідно обрати оптимальний переріз живлячого всі ТП кабелю, для чого розраховується навантаження в нормальному та післяаварійному режимі, аналогічно до

виразів (2), (3) та (4). Після чого до виразу капіталовкладень додається ціна та вартість монтажу ВВ КЛ.

2.2 Навантаження активно-реактивне

Аналогічно вираз змінюється як у пункті 1.2

В даній роботі визначення координат розміщення ДЖ виконуватимемо за критерієм мінімуму дисконтованих затрат в мережу, як для випадку евклідової, так і неевклідової метрики. Неевклідова метрика дозволяє більш адекватно врахувати геометрію реальної електричної мережі, коли лінії мережі прокладають вздовж прямокутних проїздів, створених будівлями міста. Проте для наглядного прикладу та порівняння розглянемо обидва варіанти:

1 За евклідовою метрикою

$$l_{ij} = \sqrt{(\Delta x_{ij})^2 + (\Delta y_{ij})^2} = \sqrt{(x_i - x_{ij})^2 + (y_i - y_{ij})^2}$$

2 За неевклідовою метрикою

$$l_{ij} = |x_i - x_{ij}| + |y_i - y_{ij}|$$

Обмеженнями до функції дисконтованих затрат будемо вважати перевірку НВ ліній за допустимими втратами напруги в нормальному режимі. Тому отримаємо для кожного i -го ТП m обмежень вигляду:

$$\begin{aligned} \Delta U_{дон} &= 5\% \\ \Delta U_{i,j} &\leq \Delta U_{дон} \end{aligned}$$

Таким чином, враховуються обмеження наступного виду

$$\frac{P_{ij} r_{0i,j} l_{ij}}{20U_{нн}^2} \leq \Delta U_{дон}$$

де $\Delta U_{дон} = 5\%$.

Висновки. Сформувавши розрахункові моделі функції та обмежень, можна прийти до висновку, що для таких складних оптимізаційних математичних моделей актуальним та необхідним є застосування сучасних систем, таких як Matlab, Mathcad, Excel. Тому доцільною є розробка та удосконалення комп'ютерних моделей задач проектування систем електропостачання в середовищі саме таких САПР з максимальним використанням можливостей цих систем та інтегруванням за необхідності в їх середовище нових спеціалізованих методів та програм розв'язування окремих проектних задач.

Також, з огляду на вигляд розрахованих функції та обмежень, в роботі запропоновано до використання такі методи нелінійного програмування, як метод покоординатного спуску, метод Лагранжа та градієнтний метод.

Література

1. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. - М.: Энергия, 1967. - 387 с.
2. Бутков А. Н. Определение центра нагрузок при выборе источника питания электроэнергии // Электрические станции – 1957. - №6.- С. 14-15.
3. Каждан А. Э. Центр сети // Электромеханика - 1968. - №1 - С. 35-37.
4. Каждан А. Э. Общая задача построения промышленной электрической сети. Центр промышленной электросети // Оптимизация режимов систем электроснабжения промышленных предприятий. - М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1973. - С. 13-19, 30-36.

5. Чмутов А. П. Оптимальное размещение источников питания электроэнергией // Электричество. - 1969. - №12. - С. 29-35.
6. Баркова Т.С. Математичні моделі оптимізації вибору центра мережі [Електронний ресурс] // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2011. – 398 с.. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: http://en.iee.kpi.ua/files/doc/2011r_Konferentsiya_na_IYeYe.pdf.
7. Камінський А. В., Мокін Б. І. Математичне та комп'ютерне моделювання процесів оптимізації центрального електричних мереж. Монографія. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. - 122 с.
8. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений в энергетику. Энергосистемы и электрические сети: ГКД 340.000.002-97: Утверждены приказом Минэнерго Украины от 20.01.97 №1ПС и введены в действие с 01.01.98. -Киев, 1997. - 54 с.
9. Методика визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику: ГКД 340.000.001-95: Затв. наказом Міненерго України від 23.02.95 №1 за узгодженням з Мінекономіки України (лист від 06.01.95 №44-67/7) та Держкоммістобудування України (лист від 04.01.95 №10/1) та введені в дію з 01.03.95. - Київ, 1995. - 34 с.