

А. В. Камінський, к. т. н.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ КОРОТКОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

У роботі запропоновано математичні моделі та метод визначення максимальної довжини коротких ліній електропостачальної системи, яка проектується. Запропонований метод можна використовувати на початкових стадіях проектування, коли реальні довжини ліній, їх навантаження та перерізи можуть бути невідомими. Це дає можливість обґрунтувати правомірність використання методів оптимального проектування коротких електромереж, які будуть гарантувати оптимальність і допустимість електропостачальної системи в цілому.

Ключові слова: *коротка електромережа, максимальна довжина короткої лінії, нижня границя максимальної довжини, оптимальна електромережа.*

Проектування оптимальної електропостачальної системи (ЕПС) є складним завданням, під час розв'язування якого необхідно враховувати взаємовплив одних етапів проектування на інші. Вибір окремих підсистем єдиної ЕПС за результатами незалежних оптимізаційних розрахунків, як правило, не забезпечує оптимальності системи в цілому і навіть не гарантує її допустимості. Формально це пояснюється тим, що прийняті проектні рішення на попередніх етапах проектування можуть змінити область допустимих рішень задач вибору оптимальних параметрів, елементів та підсистем ЕПС на наступних етапах проектування [1]. Тому ефективність оптимальних проектних рішень, прийнятих на наступних етапах проектування, може знизитись і призвести до зниження ефективності проекту в цілому. Зокрема, це стосується задач вибору оптимальних перерізів розподільних електромереж, які відходять від джерела живлення (ДЖ) до трансформаторних підстанцій споживачів електроенергії, та координат розміщення самого ДЖ.

Оптимальні координати розміщення ДЖ залежать від техніко-економічних характеристик ліній живлення, зокрема, від перерізів та довжин цих ліній. Довжини ліній, у свою чергу, безпосередньо залежать від координат розміщення ДЖ і можуть вплинути на допустимість використання тих чи інших перерізів цих ліній. Виникає дилема, якої можна було б уникнути, розв'язуючи обидві задачі зразу, як одну оптимізаційну задачу із спільними керованими змінними. Однак, на цей час не існує універсальних методів розв'язку цієї спільної задачі. Аналіз труднощів, які виникають на цьому шляху та деякі способи їх подолання, наведені в роботі [1]. У цій роботі, зокрема, доведено, що описана вище дилема зникає, якщо розподільні мережі є короткими.

Поняття короткої лінії та максимальної довжини такої лінії введено в роботах [1 – 3]. Лінія є короткою, якщо за будь-якого її допустимого навантаження втрата напруги в цій лінії є допустимою. Коротка лінія має максимально можливу довжину, якщо за будь-якої більшої довжини та максимально допустимого навантаження втрата напруги в цій лінії стає недопустимою.

У роботі [1] показано, що оптимальний переріз короткої лінії, яку вибирають за такими показниками ефективності як: вартість, втрати активної потужності, витрати кольорового металу, річні наведені затрати та інші, не залежить від її довжини. Тому оптимальний переріз коротких ліній за критеріями мінімуму зазначених вище показників ефективності можна визначити, використовуючи питомі значення цих показників на одиницю довжини лінії. Після цього оптимальні координати розміщення джерела живлення можуть бути визначені з використанням всіх необхідних для цього техніко-економічних параметрів попередньо вибраних ліній. Це дасть можливість уникнути складних розрахунків узгодження результатів розв'язку задач вибору оптимальних перерізів ліній та оптимальних координат розміщення ДЖ. Ось чому на початковій стадії проектування ЕПС важливо вміти оцінити, чи всі лінії

розподільної мережі будуть короткими. В такому випадку їхні оптимальні перерізи не залежать від їхньої довжини і можуть бути вибрані остаточно до визначення координат розміщення ДЖ.

Будь-яка лінія заданої марки та перерізу є короткою, якщо її довжина L_K не перевищує максимальну довжину відповідної короткої лінії $L_{K\max}$ [1], тобто

$$L_K \leq L_{K\max}. \quad (1)$$

Максимально можливі значення для L_K завжди можна оцінити виходячи з умов проектування ЕПС. Тому важливо вміти визначати також максимальну довжину короткої лінії $L_{K\max}$ заданої марки та перерізу. Це дасть можливість, використовуючи співвідношення (1), оцінити, чи буде лінія довжиною L_K короткою.

Обґрунтуємо метод визначення максимальної довжини коротких кабельних (КЛ) та повітряних (ПЛ) ЛЕП 0,38 – 35 кВ.

Оскільки для місцевих мереж, напругою менше 110 кВ, втрата напруги ΔU приблизно дорівнює повздовжній складовій спаду напруг [4], то її можна визначити за формулою:

$$\Delta U = \frac{R_0(x) \cdot P + X_0(x) \cdot Q}{U} \cdot L = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))}{U} \cdot L$$

де $R_0(x)$, – питомий активний опір лінії перерізом x ; P – активне навантаження лінії; $X_0(x)$ – питомий реактивний опір лінії перерізом x ; Q – реактивне навантаження лінії; L – довжина лінії; U – напруга лінії; φ – кут зсуву фаз між напругою та струмом.

Втрата напруги, як правило, визначається у відсотках від номінальної напруги. У цьому випадку остання формула буде мати вигляд:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))}{U} \cdot L \cdot 100.$$

Найчастіше в інженерних розрахунках для напруги, струму, питомого опору та довжини лінії використовують одиниці вимірювання кВ, А, Ом/км, км відповідно. Для визначення $\Delta U\%$ з використанням цих одиниць вимірювання відповідних параметрів останню формулу подамо в такому вигляді:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))}{10 \cdot U} \cdot L.$$

З останнього виразу визначимо довжину лінії, яка відповідає втраті напруги $\Delta U\%$ та навантаженню I для прийнятих одиниць вимірювання напруги, струму, питомого опору та довжини:

$$L = \frac{10 \cdot \Delta U\% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))}. \quad (2)$$

Для того, щоб отримати максимальну довжину короткої лінії $L_{K\max}$ перерізом x , яка відповідає максимально допустимій втраті напруги $\Delta U\% = \Delta U_{\text{доп}}\%$ та максимально допустимому за ПУЕ [5] навантаженню $I = I_{\text{доп}}(x)$, необхідно підставити ці гранично допустимі значення параметрів $\Delta U\%$ та I в формулу (2). Унаслідок цього отримаємо:

$$L_{K\max} = \frac{10 \cdot \Delta U_{\text{доп}}\% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{доп}}(x) \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))}. \quad (3)$$

Допустимі втрати напруги до кінцевих пунктів мережі повинні визначатись у залежності від рівнів напруги джерела живлення, виходячи із нормованих у ГОСТ 13109-97 [6] відхилень напруги на затискачах електроприймачів у відсотках відносно номінальної напруги. Зокрема, в роботі [7] обґрунтовано, що для міських розподільних електромереж 6-10 кВ можна приймати $\Delta U_{\text{доп}}\% = 6\%$.

Із формули (3) видно, що максимальна довжина короткої лінії залежить не тільки від її

марки та перерізу, які в сукупності визначають числові значення параметрів $I_{\text{доп}}(x)$, $R_0(x)$, $X_0(x)$, але й від кута φ зсуву фаз між напругою та струмом. Тому максимальну довжину короткої лінії заданої марки можна подати як функцію $L_{\text{Кmax}}(x, \varphi)$ двох аргументів – перерізу x та зсуву фаз φ .

Вище обґрунтовано, що необхідність в оцінці максимальної довжини короткої лінії виникає на початкових стадіях оптимального проектування ЕПС, коли значення параметрів x та φ , як правило, ще невідомі. Незважаючи на це, в багатьох випадках є можливість довести, що лінія, оптимальний переріз якої буде визначатись на наступних етапах проектування ЕПС, є короткою.

Для цього необхідно визначити нижню межу максимальної довжини короткої лінії $HGL_{\text{Кmax}}$, яка у випадку виконання умови $L_{\text{К}} \leq HGL_{\text{Кmax}}$ гарантувала б, що будь-яка лінія живлення довжиною $L_{\text{К}}$ за будь-яких допустимих значень її перерізу та кута зсуву фаз між струмом та напругою буде короткою.

Така задача може бути зведена до розв'язку оптимізаційної задачі спеціального виду. Як керовані змінні цієї задачі повинні виступати переріз лінії та кут зсуву фаз між струмом та напругою, а як показник ефективності розв'язку, який необхідно мінімізувати – функція $L_{\text{Кmax}}(x, \varphi)$.

Наведемо математичну модель цієї задачі для випадку окремої кабельної лінії живлення. Нехай максимально можлива довжина КЛ не може перевищувати $L_{\text{К}}$. У загальному випадку, лінія живлення може складатись з одного або з двох кабелів. Математична модель задачі для такої лінії матиме вигляд:

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{Кmax}}(x, \varphi) &= \frac{10 \cdot \Delta U_{\text{доп}} \% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{доп}}(x) \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))} \rightarrow \min_{x, \varphi} \\ 0 \leq \varphi &\leq \frac{\pi}{2}, \\ I_{\text{доп}}(x) &\geq I; \\ k > 1 &\Rightarrow k_{\text{па}} \cdot I_{\text{доп}}(x) \geq \frac{k \cdot I \cdot k_{\text{нна}}}{k-1}; \\ x &\geq x_{\text{кз}} = \frac{I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t_{\text{п}}}}{C}; \\ x &\in X_{\text{ст}}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де I – струм окремого кабеля КЛ; k – кількість ліній; $k_{\text{па}}$ – максимально допустимий коефіцієнт навантаження КЛ у післяаварійному режимі роботи; $k_{\text{нна}}$ – частка загального навантаження споживача електроенергії, яка повинна передаватись КЛ у післяаварійному режимі роботи; $x_{\text{кз}}$ – мінімальний переріз лінії за умовою термічної дії струмів короткого замикання (КЗ); $I_{\text{кз}}$ – струм КЗ на початку КЛ; $t_{\text{п}}$ – приведений час КЗ; C – тепловий коефіцієнт, який залежить від номінальної напруги лінії та матеріалу провідника (задається для ПЛ та КЛ у таблицях 8, 9 ГОСТ 30323-95 [8]). $X_{\text{ст}}$ – множина стандартних перерізів КЛ.

Очевидно, що оцінити нижню межу максимальної довжини короткої лінії $HGL_{\text{Кmax}}$ можна за формулою $HGL_{\text{Кmax}} = L_{\text{Кmax}}(x^*, \varphi^*)$, де (x^*, φ^*) – розв'язок моделі (4), а будь-яка лінія живлення, довжина якої не може перевищувати $L_{\text{К}}$, буде короткою, якщо буде виконуватись умова $L_{\text{К}} \leq HGL_{\text{Кmax}}$. Оскільки з допомогою моделі (4) визначається нижня межа можливих значень максимальної довжини короткої лінії, то обернене твердження неправильне.

Також вимагається перевірка перерізів повітряних ліній живлення ПУЕ [5] на відсутність загального коронування та механічну міцність. Тому модель (4) для повітряних ліній буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 L_{K\max}(x, \varphi) &= \frac{10 \cdot \Delta U_{\text{доп}} \% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{доп}}(x) \cdot (r_0(x) \cdot \cos(\varphi) + x_0(x) \cdot \sin(\varphi))} \rightarrow \min_{x, \varphi}, \\
 0 \leq \varphi &\leq \frac{\pi}{2}, \\
 I_{\text{доп}}(x) &\geq I; \\
 k > 1 \Rightarrow k_{\text{па}} \cdot I_{\text{доп}}(x) &\geq \frac{k \cdot I \cdot k_{\text{нпа}}}{k-1}; \\
 x \geq x_{\text{кз}} &= \frac{I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t_{\text{п}}}}{C}; \\
 x &\geq x_{\text{кор}} \\
 x &\geq x_{\text{мех}} \\
 x &\in X_{\text{ст}},
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де $x_{\text{кор}}$ – мінімальний переріз ПЛ, в якому не виникає загального коронування; $x_{\text{мех}}$ – мінімальний переріз ПЛ за умовою механічної міцності.

У випадку кабельної лінії живлення обмеження на відсутність загального коронування та механічну міцність перерізу КЛ були пропущені, оскільки виконання цих умов гарантують заводи, які виготовляють кабельну продукцію.

Якщо навантаження лінії живлення невідомо, то в моделях (4), (5) необхідно пропустити обмеження на допустимість нагрівання лінії в нормальному та в післяварійному режимі роботи. У цьому випадку знайдена в результаті розв'язку моделей (4), (5) нижня межа можливих значень максимальної довжини короткої лінії буде стосуватись не окремо взятої лінії живлення, а всіх ліній, які будуть відходити від джерела живлення. Тому всі ці лінії будуть короткими, якщо максимально можлива довжина кожної із них не буде перевищувати знайдену величину $HL_{K\max}$.

Керованими змінними в математичних моделях (4), (5) виступають переріз лінії та кут зсуву фаз між струмом та напругою. Перша керована змінна може приймати тільки дискретні та нормовані значення, а друга є неперервною. Це є основною причиною відсутності на цей час універсальних методів теорії прийняття рішень для безпосереднього розв'язування задач за отриманими моделями. Тому пропонуємо окремий метод розв'язування поставленої задачі, який ґрунтується на таких властивостях цієї задачі:

1. Всі умови, яким повинен відповідати переріз лінії живлення, як це видно із моделей (4) та (5), обмежують цю керовану змінну знизу. У такому випадку нижня межа області допустимих рішень для перерізів лінії живлення буде дорівнювати $\max_i(x_{\min_i})$, $i=1, \dots, m$, де x_{\min_i} – мінімально допустимий переріз лінії, який задовольняє i -тому обмеженню; m – загальна кількість обмежень.

2. Залежність максимальної довжини короткої лінії від кута зсуву фаз φ між напругою та струмом лінії при будь-якому перерізі цієї лінії на всій множині можливих значень параметра φ є однокстремальною, гладкою та випуклою. Приклад такої залежності для кабеля з алюмінієвими жилами та паперовою просоченою ізоляцією подано на рис. 1.

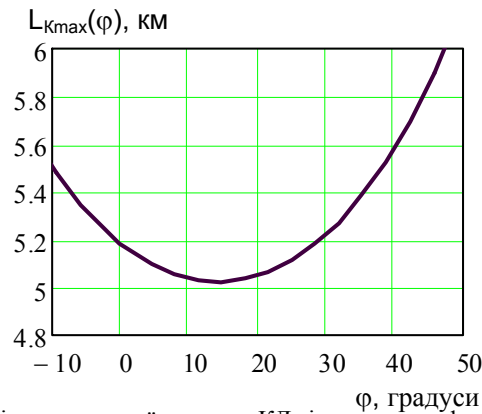


Рис. 1. Приклад залежності максимальної довжини КЛ від кута зсуву фаз між струмом та напругою

Поставлену задачу пропонуємо розв'язувати в два етапи. На першому етапі необхідно знайти нижню межу області допустимих перерізів лінії живлення х_{доп}, використовуючи першу властивість задачі:

$$x_{\text{доп}} = \max_i(x_{\text{min}_i}), \quad i = 1, \dots, m.$$

На другому етапі для всіх стандартних перерізів лінії живлення не менших за х_{доп} – розв'язати задачу:

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{Kmax}}(x_i, \varphi) &= \frac{10 \cdot \Delta U_{\text{доп}} \% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{доп}}(x) \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))} \rightarrow \min_{\varphi}, \\ 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6)$$

де n – кількість стандартних перерізів лінії живлення, які відповідають умові $x_i \geq x_{\text{доп}}$.

Задача мінімізації функції $L_{\text{Kmax}}(x_i, \varphi)$, згідно з моделлю (6) в силу властивості 2 цієї задачі, може бути розв'язана за допомогою відомих методів оптимізації і, зокрема, за допомогою градієнтних методів, вбудованих у такі математичні САПР як: Mathcad, Matlab, Excel та інші. У результаті ми отримаємо n розв'язків φ_i^* , $i = 1, \dots, n$. Тепер нижню межу максимальної довжини короткої лінії легко знайти за формулою:

$$HGL_{\text{Kmax}} = \min_i(L_{\text{Kmax}}(x_i, \varphi_i^*)), \quad i = 1, \dots, n.$$

Отримавши цей результат, ми можемо бути впевнені, що будь-яка лінія даної марки довжиною $L_K \leq HGL_{\text{Kmax}}$ буде короткою.

Проведені автором дослідження показали, що запропонований метод розрахунку максимальної довжини короткої лінії не складно реалізувати в середовищі таких програм як: Mathcad, Matlab, Excel з використанням вбудованих у них градієнтних методів оптимізації. При цьому для отримання результату у відповідні комп'ютерні моделі цієї задачі достатньо тільки підставити вихідні дані.

У таблицях 1, 2 подано приклади отриманих з допомогою запропонованого методу залежностей максимальної довжини коротких кабельних та повітряних ліній від мінімально допустимого перерізу цих ліній.

Таблиця 1.

**Максимальна довжина короткої КЛ 10 кВ з алюмінієвими жилами та паперовою ізоляцією
в залежності від перерізу лінії**

Переріз, мм ²	Довжина, м
16	2377
25	3094
35	3365
50	3950
70	4652
95	5023
120	5338
150	5709
185	6077
240	6539

Таблиця 2.

Максимальна довжина короткої ПЛ 10 кВ марки АС у залежності від перерізу лінії

Переріз, мм ²	Довжина, м
25	1971
35	2266
50	2340
70	2354
95	2271
120	2121

Із таблиці 1 бачимо, що максимальна довжина короткої КЛ даної марки залежно від мінімально допустимого перерізу лінії може змінюватись від 2,4 до 6,5 км. Як показали дослідження, проведені автором, подібна картина має місце також для силових кабелів 10 кВ інших марок. Це дає можливість стверджувати, що до коротких ліній 10 кВ можна віднести кабельні лінії більшості підприємств та районів міст.

У той же час із таблиці 2 видно, що максимальна довжина короткої повітряної лінії незначно залежить від її мінімально допустимого перерізу і складає приблизно 2,2 км.

Висновки

Запропоновано метод, за допомогою якого можна довести, що лінії електропостачальної системи, яка проектується, будуть короткими. Метод дозволяє зробити це в умовах, коли довжини ліній, їхні навантаження та перерізи можуть бути невідомими. Розрахунки за цим методом можна легко виконати в середовищі таких програм як: Mathcad, Matlab, Excel. Це дає можливість обґрунтувати правомірність використання досить простих методів оптимального проектування коротких електромереж [1], які будуть гарантувати оптимальність і допустимість ЕПС у цілому. Результати досліджень, виконані автором з використанням запропонованого методу, показують, що більшість кабельних електромереж промислових підприємств та районів міст належать до коротких. Тому для них доцільно використовувати такі методи проектування.

У випадку, коли за допомогою запропонованого методу не вдасться довести, що мережі ЕПС будуть короткими, процес оптимального проектування таких мереж може значно ускладнитись, оскільки існуючі методи проектування в цих умовах не гарантують досягнення оптимуму з ЕПС у цілому.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Камінський А. В. Математичне та комп'ютерне моделювання процесів оптимізації центрування електричних мереж / А. В. Камінський, Б. І. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 122 с. – ISBN 966-641-139-3.
2. Мокін Б. І. Комп'ютерне моделювання процесу пошуку оптимальних перерізів кабельних ліній / Б. І. Мокін,

- А. В. Камінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – №5. – С. 49 – 54.
3. Мокін Б. І. Комп'ютерне моделювання процесів пошуку центру електричної мережі / Б. І. Мокін, А. В. Камінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – №2. – С. 80-85.
4. Электрические системы и сети / [Буслова Н. В., Винославский В. Н., Денисенко Г. И., Перхач В. С.] ; под ред. Г. И. Денисенко. – К.: Вища школа. 1986. – 584 с.
5. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – [6-е изд., перераб. и доп.] – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
6. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах общего назначения : ГОСТ 13109-97. – [Введ. 2000-01-01]. – ИПК Издательство стандартов, 1998. – 31 с.
7. Козлов В. А. Электроснабжение городов / Козлов В. А. – [Изд. 2-е переработанное] – Л.: Энергия, 1977. – 280 с.
8. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания : ГОСТ 30323-95. – [Введ. 1994-01-01] – ИПК Издательство стандартов, 1994. – 47 с.

Камінський Андрій Вячеславович – к. т. н., доцент кафедри моделювання та моніторингу складних систем, тел.: (0432)-598477.

Вінницький національний технічний університет.