

## ВРАХУВАННЯ ОБМЕЖЕНЬ МЕТОДОМ БАР'ЄРНИХ ФУНКЦІЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Лепський М.Г., магістрант, Банін Д.Б., к.т.н., доцент

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем*

**Вступ.** За останні роки в енергетиці України спостерігається збільшення споживання електроенергії з перерозподілом часток споживання промисловими і побутовими споживачами. Так, зменшилась частка споживання електроенергії промисловістю, але при цьому значно зросла частка споживання електроенергії населенням. За звітними даними відбулося зниження загальних технологічних витрат електроенергії на її транспортування електричними до рівня 11,8%, в тому числі нормативних (технічних) витрат електроенергії – 12,8%, понаднормативних (нетехнічних) витрат електроенергії до -1,0%.

Подальше зниження технологічних витрат електроенергії на її транспортування електричними мережами можливе як за рахунок глибокої реконструкції розподільчих електричних мереж, так і за рахунок впровадження задач оптимізації режимів електричних мереж: оптимізації місць розривів мереж 35, 10, 6 кВ, оптимізація роботи двотрансформаторних підстанцій 35, 10, 6 кВ, регулювання коефіцієнтів трансформації, оптимізація потоків реактивної потужності та ін.

**Постановка задачі.** Оптимальний режим, який отримано в результаті вибору місця для установаження компенсаційного пристрою (КП) і завантажений оптимальними значеннями  $Q_{КП}$ , повинен знаходитись у припустимій області, тобто повинні виконуватись технологічні, режимні, балансні обмеження.

До технологічних обмежень відносяться припустимі границі регуляторів режиму – реактивна потужність КП ( $Q_{КП}$ ) і коефіцієнти трансформаторів ( $K_T$ ), тобто повинні виконуватись умови  $Q_{\min} \leq Q_{КП} \leq Q_{\max}$ ,  $K_{\min} \leq K_T \leq K_{\max}$ . Відзначимо, що ці обмеження мають дискретний характер.

До режимних обмежень, звичайно, відносяться обмеження за припустимими рівнями напруги та припустимому завантаженню трансформаторів і ліній, тобто повинні виконуватись умови  $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$ ,  $S_{ТР} \leq S_{\text{доп}}$ ,  $I_{Л} \leq I_{\text{доп}}$ . В першу чергу ці обмеження забезпечуються елементами комплексно (КСК) [1], але обов'язково повинне бути проконтрольоване і реалізоване виконання режимних обмежень для всіх вузлів схеми, наприклад, за рахунок регулювання системними трансформаторами.

До балансних обмежень відносяться вимоги (рекомендації) щодо бажаних рівнів перетікань реактивної потужності по вузлах зв'язку з енергосистемою (визначає ЕС), з мережами 10 кВ районів або філій (визначає ЕО), а також з мережами інших електропередавальних організацій.

В задачі оптимізації розподілу реактивних потужностей, зокрема в локальному випадку, при регулюванні реактивної потужності в певній точці, автоматично виникає вплив на режимні характеристики схеми в цілому. Виділимо складові цього впливу: по-перше, це зміна сумарних втрат активної

потужності:  $\Delta P_s = f(Q_{кп}) \Rightarrow \frac{\partial \Delta P}{\partial \Delta Q} \Rightarrow \Delta P_{s\min}$  – стандартний випадок для оптимізації розподілу реактивних потужностей за критерієм мінімуму втрат потужності.

Крім цього, компенсаційний пристрій впливає на напругу прилеглих вузлів, на потужність яка протікає по живильному трансформатору, впливає та змінює потоки та струми в лініях.

З точки зору критерію оптимальності, рівняння для втрат надзвичайно складне. Воно представляю собою квадратичну форму з матрицею опору та потужностями в комплексному виді. Для того, щоб знайти оптимальні втрати потрібно розрахувати окремі похідні  $\frac{\partial \Delta P}{\partial \Delta Q}$  та розв'язувати це рівняння прирівнявши його до нуля, забезпечуючи мінімум втрат. Ця складність може бути обійдена, якщо ми будемо застосовувати чисельні методи рішення задачі оптимізації режиму [2].

Крім цього, вплив на напругу, на потужність потоків в трансформаторі, на струми лінії потребують врахування режимних обмежень, котрі ніяким іншим методом, крім як бар'єрними функціями не можуть бути обмежені.

В нашій задачі локальної оптимізації використовуємо для пошуку рішення методи квадратичної апроксимації, чисельного диференціювання, бар'єрні функція для врахування обмежень [3].

Представлена постановка по бар'єрним функціям:

$$Q_U^-, Q_U^+ \leq |Q^U \leq f(U) | \leq U_{\min}, U_{\max} - \text{відомі реактивні обмеження}$$

$$Q_T^{\max} \leq |Q^T \leq f(S_T) | \leq S_T^{\text{доп}}$$

$$Q_L^{\max} \leq |Q^L \leq f(I_L) | \leq I_L^{\text{доп}}$$

Якщо мати такі функції, то підставивши в них відомі режимні обмеження  $U_{\min}, U_{\max}, S_T^{\text{доп}}, I_L^{\text{доп}}$  отримаємо допустимі реактивні потужності, які відповідають режимним обмеженням.

Ще є технологічні обмеження, які розраховуються достатньо легко шляхом нерівностей. На рис. 1 зображена загальна структура врахування обмежень з врахуванням бар'єрних функцій. В цьому випадку, по осі реактивної потужності за рахунок оптимального значення проставляються обмежувальні  $Q_U^-, Q_U^+, Q_T^{\max}, Q_L^{\max}$ . Діапазон вузлових рішень заштрихован.

Чисельні методи розрахунку бар'єрних функцій показані на рис. 1. Будемо використовувати метод квадратичної апроксимації. Для цього нам потрібно мати 3 заміри:  $Q^+, Q_T, Q^-$  та для кожного значення визначені по 3 значення втрат, напруг, потоків трансформаторів, струмів в лінії. За допомогою цієї табличної функції маємо квадратичні трьохчлени для кожної бар'єрної функції за формулами 1 та 2:

$$\Delta P = A_2 Q^2 + A_1 Q + A_0 \quad (1)$$

$$Q^U = A_2 U^2 + A_1 U + A_0 \quad (2)$$

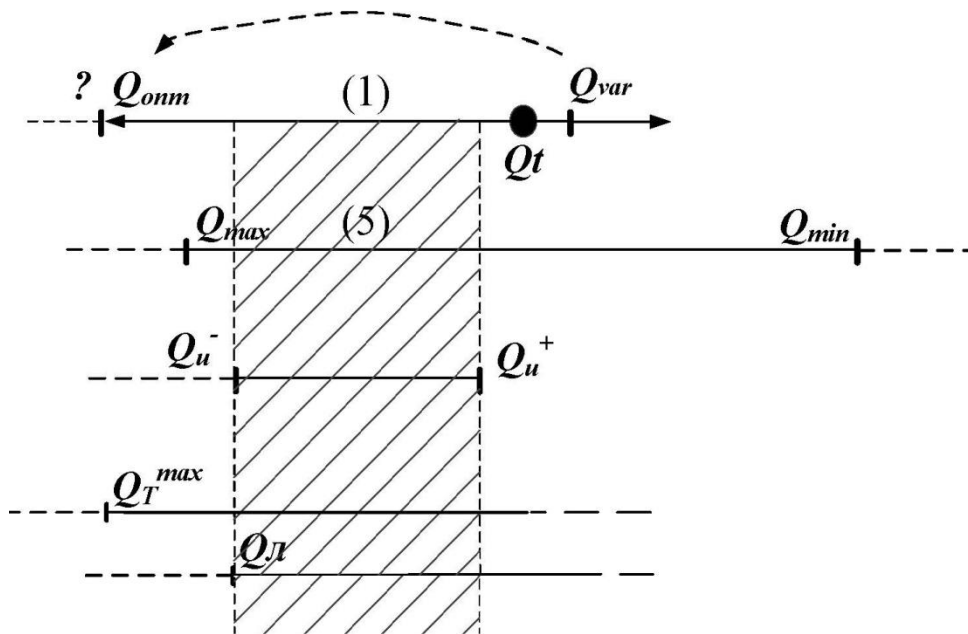


Рисунок 1 – Графічне представлення обмежень, розрахованих за бар’єрними функціями

Діапазон можливих рішень на рис. 1 заштриховано.

Локальна оптимізація реактивної потужності виконується за наступним алгоритмом:

1. На розрахунковій схемі вибирається вузол, у якому буде корегуватися значення реактивної потужності;
2. Для заданого вузла підбирається апроксимуюча функція  $\Delta P = f(Q)$ ;
3. Для заданого вузла підбирається бар’єрна апроксимуюча функція  $Q = f(U)$ ;
4. На основі функції  $\Delta P = f(Q)$  визначається оптимальне значення реактивної потужності у заданому вузлі;
5. Вираховується обмеження з урахуванням припустимого рівня напруги у вузлі за допомогою бар’єрної функції;
6. З урахуванням обмеження та конструкційних особливостей визначається потужність компенсуючого пристрою, який приймається до встановлення у заданому вузлі для оптимізації розподілу реактивної потужності.

**Матеріали і результати досліджень.** Приведемо приклад локальної оптимізації реактивної потужності з урахуванням бар’єрної функції. Найпростіша розрахункова схема приведена на рис. 2.

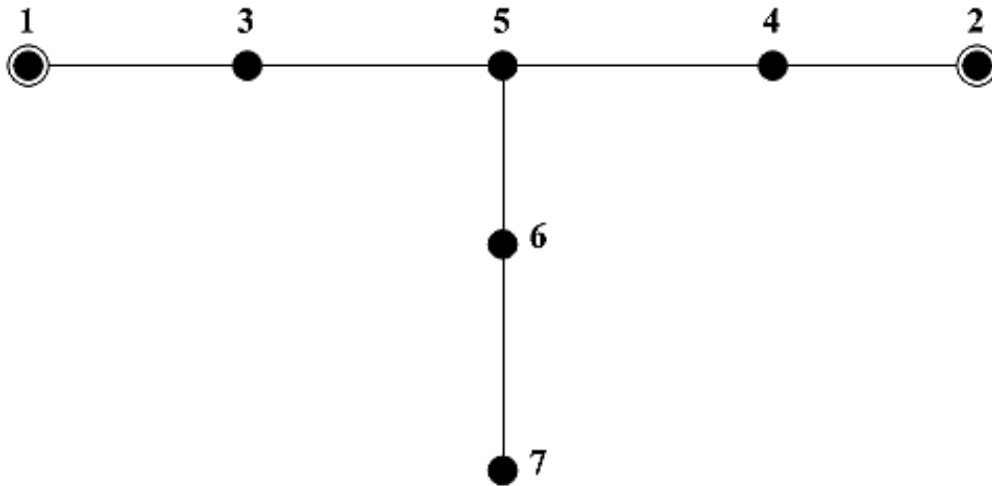


Рисунок 2 – Розрахункова схема

Вихідні дані до схеми наступні:  $z = 10 + j20$ ;  $S_5 = 0 + j0$ . Прийняті наступні обмеження за рівнем напруги:  $U_7 \leq 110$ кВ. Потужність компенсуючого пристрою варіюється у межах:  $Q_{кп} = (0 \div 10)$ МВАр.

Значення навантажень всіх інших вузлів та напруг БП наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані

$U_1, \text{кВ}$	$U_2, \text{кВ}$	$P, \text{МВт}$	$Q_3, \text{МВАр}$	$Q_4, \text{МВАр}$	$Q_6, \text{МВАр}$	$Q_7, \text{МВАр}$
120	118	10	5	5	8	8

Значення реактивної потужності будемо корегувати у вузлі №7. Заготовлюємо табличну функцію для трьох точок (табл. 2).

Таблиця 2 – Таблична функція

	+1.0	$Q$	-1.0
$Q_7, \text{МВАр}$	9	8	7
$\Delta P, \text{МВт}$	2.08159	1.98173	1.88963
$U_7, \text{кВ}$	104.207	104.838	105.459

За даними табл. 2 розраховуємо вирази апроксимуючих функцій:

$$1. \Delta P = 0.00388Q^2 + 0.03389Q + 1.46277;$$

$$2. Q_7 = -0.01863U^2 + 2.30965U - 29.32544.$$

Визначаємо на основі функції  $\Delta P = f(Q)$  величину  $Q_7^{\text{опт}}$  за формулою 3:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial \Delta Q} = 2A_2Q + A_1 = 0 \Rightarrow Q_7^{\text{опт}} = \frac{-A_1}{2A_2} = \frac{-0.03389}{2 \cdot 0.00388} = -4.37 \text{ МВАр} \quad (3)$$

Також визначимо приріст  $\Delta Q_7^{\text{опт}}$ :

$$\Delta Q_7^{\text{опт}} = Q_7 - Q_7^{\text{опт}} = 8 - (-4.367) = 12.367 \text{ МВАр}$$

Вирахуємо обмеження з урахуванням рівня напруги:

$$Q_7^U = -0.01663 \cdot 110^2 + 2.30965 \cdot 100 - 29.32544 = -0.687 \text{ МВАр}$$

Побудуємо інтегральну систему обмежень для визначення потужності компенсуючого пристрою (рис. 3):

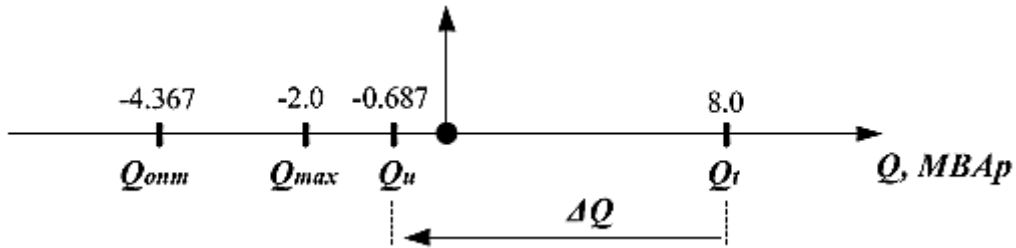


Рисунок 3 – Інтегральна система обмежень для вузла 7

Згідно до обмеження з урахуванням рівня напруги у заданому вузлі до встановлення приймається КП потужністю  $Q_{КП} = 8.687 \text{ MVar}$ . У цьому випадку втрати активної потужності зменшуються з 1.98173 до 1.41207 МВт.

**Висновки.** В даній статті розглянуто задачу оптимізації потоків реактивної потужності з урахуванням технологічних і режимних обмежень. На відміну від стандартних реалізацій, в якій обмеження включаються до цільової функції оптимізації використано метод бар'єрних функцій, що переводять кожний вид обмеження (напруги, потужності, струми) до відповідних граничних значень реактивної потужності. Граничні значення реактивної потужності отримані шляхом квадратичної апроксимації відповідних залежностей:  $Q = f(U), Q = f(S_{mp}), Q = f(I_n)$ ; виконано розрахунки апроксимуючих функцій для семивузлової схеми, визначено інтегральну систему обмежень з врахування технологічних і режимних обмежень.

#### Перелік посилань

1. Д.Б. Банін, М.Д. Банін, О.С. Яндульський, Ю.М. Бондаренко, О.І. Ришкевич, А.Е. Зоммер, А.В. Левицкий, С.Я. Меженний, А.М. Гушля, О.А. Буславець Практичні питання комплексної системної компенсації реактивної потужності в електричних мережах 110/35/10 кВ електропередавальних організацій // Енергетика та електрифікація.-2013. № 8, с.2-16.
2. Банін Д.Б., Банін М.Д., Гнатовський А.В. Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач. Моделі, методи, алгоритми і програми для промислових комп'ютерних комплексів. Навчальний посібник – К.: НТУУ “КПІ”. Вид-во “Політехніка” 2016.
3. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.; пер. с англ. Лебедев В.Ю. – М.: Мир, 1985. – 509 с.