

УДК 621.318.728

Б. С. Рогальський, д. т. н., проф.;

С. О. Кузьмінська, асп.

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СТУПЕНЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ ЧУТЛИВОСТІ

Вступ

В даний час задачі компенсації реактивної потужності досить забезпечені методично й алгоритмічно. Характерним, коли використовуються наявні методи компенсації, є прийняття рішень у визначенні оптимального ступеня компенсації без урахування чутливості критерію оптимальності до параметрів стану. Для досягнення помітної ефективності від компенсації реактивної потужності необхідно постійно здійснювати корекцію параметрів системи. У результаті аналізу чутливості визначається наступне [1]. По-перше, відшуковуються параметри, що роблять найбільший вплив на оптимальне рішення. Якщо такі параметри існують, то можливо доцільніше досліджувати питання про корекцію відповідних властивостей мережі [2]. По-друге, визначається вплив на оптимальні стани мережі варіацій неточно заданих параметрів. Аналіз чутливості дозволяє реально сформулювати вимоги до інформаційного забезпечення задачі оптимізації, а також виділити ті параметри, похибки визначення яких не роблять великого впливу на результати оптимізації і тому уточнювати їхні значення немає необхідності [1]. По-третє, з'ясовуються можливі реакції мережі на некеровані зовнішні впливи. Може виявитися, що вихідна математична модель вимагає істотної корекції, оскільки практична реалізація оптимальних рішень не дає очікуваного результату [2].

Якість оптимального керування істотно залежить від того, наскільки обґрунтовано обрана зона нечутливості критерію оптимальності і визначені відповідні зони нечутливості регульованих параметрів. З цією метою необхідно розробити алгоритм і програму визначення зони нечутливості (оптимальності), у якій невідповідність поточних і оптимальних станів характеризується великими затратами. Цій проблемі і присвячується дана стаття.

Розрахунок оптимального ступеня компенсації

Розрахунок оптимального ступеня компенсації реактивних навантажень для мереж підсистеми (економічна задача), яка об'єднує мережі енергопередавальної компанії і споживачів, виконується шляхом мінімізації цільової функції [3]

$$Z = \dot{Q}_H \dot{D} a + \dot{Q}_H \dot{I} \dot{R} \dot{C} (\dot{Q}_H \dot{I})^t (1 - a)^2, \quad (1)$$

де \dot{Q}_H — вектор-рядок реактивних навантажень вузлів підсистеми, МВАр; \dot{D} — вектор-рядок (транспонований) питомих витрат на генерацію реактивних потужностей джерелами у вузлах мереж підсистеми, тис.грн/МВАр; a — ступінь компенсації реактивних навантажень в мережах підсистеми (або потужність компенсувальних установок (КУ) в мережах підсистеми у відносних одиницях): $a = \frac{Q_{ку}}{Q_M}$ (де $Q_{ку}$ — сумарна потужність компенсувальних установок в абсолютних одиницях, МВАр; Q_M — максимум реактивних навантажень на вводі мереж підсистеми, МВАр); \dot{I} — матриця шляхів; \dot{R} — діагональна матриця активних опорів віток схеми заміщення мереж підсистеми, Ом; \dot{C} — діагональна матриця коефіцієнтів: $C_{0i} / K_0 U_{Hi}^2$ (де C_{0i} — питома вартість витрат в i -й вітці схеми заміщення, грн/кВт; U_{Hi} — номінальна або фактична, в середньому за добу, напруга в i -й вітці мереж підсистеми, кВ; K_0 — коефіцієнт відхилення фактичного поточного

зподілу реактивної потужності в мережах підсистеми від оптимального значення ($K_0 \geq 1$).

Питомі затрати на генерацію реактивної потужності в i -му вузлі $Z_{П.Г.i}$ і питомі затрати на передавання реактивної потужності по мережам підсистеми $Z_{П.Г.i}$, значення величин K_0 і C_{0i} визначаються за формулами, наведеними у [4, 5].

Врахувавши вираз $Z_{П.Г.} = Z - \dot{Q}_H \dot{P} \dot{R} \dot{C} (\dot{Q}_H \dot{P})^t$, функція (1) прийме вигляд

$$Z_{П.Г.} = (\dot{Q}_H \dot{D} - 2\dot{Q}_H \dot{P} \dot{R} \dot{C} (\dot{Q}_H \dot{P})^t) a + \dot{Q}_H \dot{P} \dot{R} \dot{C} (\dot{Q}_H \dot{P})^t a^2. \tag{2}$$

Критеріальна модель цільової функції

Запишемо дану функцію в критеріальному вигляді, для цього скористаємося загальним підходом побудови критеріальних моделей [6, 7]:

$$Z_{П.Г.}^* = \pi_1 a^* + \pi_2 a^{*2}, \tag{3}$$

де $Z_{П.Г.}^* = \frac{Z_{П.Г.}}{Z_{П.Г.min}}$; $a^* = \frac{a}{a_{опт}}$; $\pi_1 = \frac{\dot{Q}_H \dot{D} - 2\dot{Q}_H \dot{P} \dot{R} \dot{C} (\dot{Q}_H \dot{P})^t}{Z_{П.Г.min}} a$; $\pi_2 = \frac{\dot{Q}_H \dot{P} \dot{R} \dot{C} (\dot{Q}_H \dot{P})^t a^2}{Z_{П.Г.min}}$ —

критерії подібності, що характеризують долю кожної складової цільової функції приведених затрат на генерацію від компенсації реактивної потужності.

Критерії подібності оптимального варіанта визначаються з умов ортогональності та нормування [6]

$$\begin{cases} \pi_1 + \pi_2 = 1; \\ \pi_1 + 2\pi_2 = 0, \end{cases} \text{ звідки } \pi_1 = 2, \pi_2 = -1.$$

З урахуванням отриманого результату функція (3) прийме вигляд

$$Z_{П.Г.}^* = 2a_{опт}^* - a_{опт}^{*2}. \tag{4}$$

Для визначення оптимального ступеня компенсації скористаємось системою (оскільки $a_{*0} = 1$, тому $a_{опт} = a$)

$$\begin{cases} \frac{\dot{Q}_H \dot{D} - 2\dot{Q}_H \dot{P} \dot{R} \dot{C} (\dot{Q}_H \dot{P})^t}{Z_{П.Г.min}} a_{опт} = 2; \\ \frac{\dot{Q}_H \dot{P} \dot{R} \dot{C} (\dot{Q}_H \dot{P})^t a_{опт}^2}{Z_{П.Г.min}} = -1. \end{cases} \tag{5}$$

Звідки отримаємо значення $a_{опт}$ в іменованих одиницях, врахувавши, $\dot{Q}_B = \dot{Q}_H \dot{P}$:

$$a_{опт} = 1 - \frac{\dot{Q}_H \dot{D}}{2\dot{Q}_B \dot{R} \dot{C} \dot{Q}_B^t}. \tag{6}$$

Використовуючи даний підхід розрахунку оптимального ступеня компенсації для електричної мережі, було обчислене значення $a_{опт} = 0,757$.

Аналіз чутливості критеріальної моделі

У результаті критеріального аналізу визначається чутливість математичної моделі й оптимальних рішень, установлюються допустимі області оптимальних рішень, визначаються параметри, за допомогою яких здійснюється оптимальне керування.

Отримана критеріальна модель $Z_{П.Г.}^* = f(a^*)$ дозволяє в результаті аналізу чутливості визначити граничні значення зони нечутливості, в межах яких необхідно здійснювати оптимальне керування.

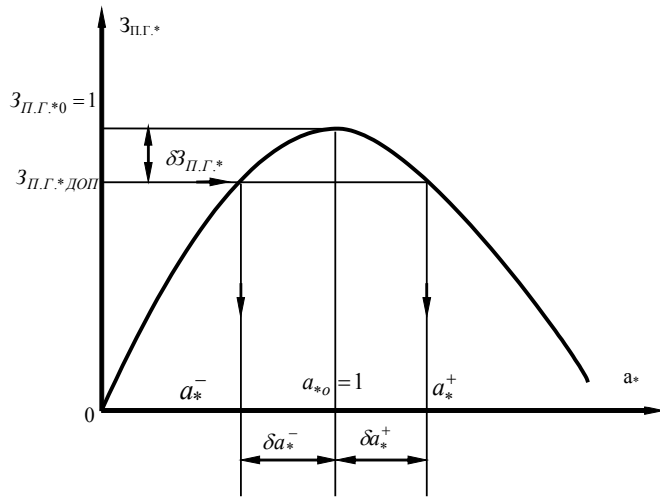


Рис. 1. Визначення допустимих відхилень ступеня компенсації

Оскільки в процесі побудови моделі (3) як базисної обраний оптимальний варіант, то за її допомогою можна досліджувати вплив відхилень ступеня компенсації a від оптимального на відносно збільшення приведених затрат. Тобто, досліджувати оптимальне рішення за оперативною корекцією параметрів керування на чутливість [7].

За допомогою співвідношення (3) у процесі оптимального керування режимами електричних мереж за допомогою компенсувальних установок може бути вирішена і пряма, і зворотна задачі чутливості. У прямій задачі установлюється відносна зміна значення критерію оптимальності Z_* у разі відхилення ступеня компенсації від опти-

мального значення. Мета вирішення зворотної задачі — визначення області допустимого відхилення ступеня компенсації з заданим допустимим відхиленням критерію оптимальності.

В даній статті пропонується розв’язання зворотної задачі. Характерною особливістю застосування з цією метою критеріального методу є те, що області допустимих відхилень a_*^- і a_*^+ оптимізаційних параметрів знаходяться без трудомісткої процедури розрахунку їх оптимальних значень.

У [7] показано, що за умови апроксимації цільової функції F_{*j} двочленним позиномом вигляду

$$F_{*j} = a_j u_{*j}^{\alpha_j} + b_j u_{*j}^{\beta_j}, \tag{7}$$

розв’язок зворотної задачі чутливості може бути отриманий в аналітичній формі. У (7) $a_j, b_j, \alpha_j, \beta_j$ — постійні коефіцієнти, що відтворюють характер залежності і ступінь впливу керувальних параметрів u_{*j} на значення F_* .

Згідно методики, розглянутої в [7], вирази для граничних значень зони нечутливості параметрів мають вигляд

$$u_{*j}^- = \left(\frac{\alpha - \beta}{-\beta} \frac{a}{1 + \delta F_*} \right)^\alpha; \quad u_{*j}^+ = \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha} \frac{b}{1 + \delta F_*} \right)^\beta. \tag{8}$$

Отримана в такий спосіб область δM_u допустимих відхилень змінних u_{*j} від своїх оптимальних значень за змістом містить безліч можливих із заданою точністю рівно економічних варіантів функціонування досліджуваного об’єкта. Область δM_u використовується для прийняття рішень управління станами електричної системи.

Визначимо зону нечутливості для математичної моделі (4).

В даному випадку $\alpha = 1; \beta = 2; a = 1; b = -2$, тому

$$a_*^- = \left(\frac{1-2}{-2} \frac{2}{1 + \delta Z_{П.Г.*}} \right)^1 = \left(\frac{1}{1 + \delta Z_{П.Г.*}} \right); \tag{9}$$

$$a_*^+ = \left(\frac{1-2}{1} \frac{-2}{1 + \delta Z_{П.Г.*}} \right)^2 = \left(\frac{2}{1 + \delta Z_{П.Г.*}} \right)^2.$$

Задаючись відповідним значенням допустимого відхилення граничних затрат від його оптимального значення можна остаточно визначити граничні межі області нечутливості. Враховуючи мі-

ру точності розрахунків рекомендується приймати значення $\delta Z_{П.Г.*}$ в межах 5...10 %.

Як видно з виразів (9), нижня межа зони нечутливості a_*^- завжди буде близьким до оптимального значення, а верхня межа більше 1, що є економічно недоцільним, тому приймаємо $a_*^+ = 1$. Отже, керування необхідно здійснювати в невеликому діапазоні значень.

Висновки

1. Вдосконалено розв'язання задачі, що полягає у визначенні оптимального ступеня компенсації реактивних навантажень для електричних мереж з урахуванням чутливості оптимальних рішень. Воно відрізняється від відомих тим, що в основу його покладене критеріальне моделювання. Використання останнього забезпечує можливість аналізу чутливості оптимальних рішень у відносних одиницях без трудомісткої процедури пошуку оптимальних значень керувальних параметрів, що в підсумку підвищує ефективність компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

2. Розроблено математичну модель, що дозволяє ефективніше розв'язувати задачі аналізу чутливості оптимальних рішень визначення оптимального ступеня компенсації реактивної потужності. В її основу покладене критеріальне моделювання, що допускає перетворення вихідної математичної моделі в безрозмірну форму.

Приклад

Визначення оптимального значення ступеня компенсації для мереж підсистеми з урахуванням чутливості.

Схема заміщення мереж підсистеми показана на рис. 2.

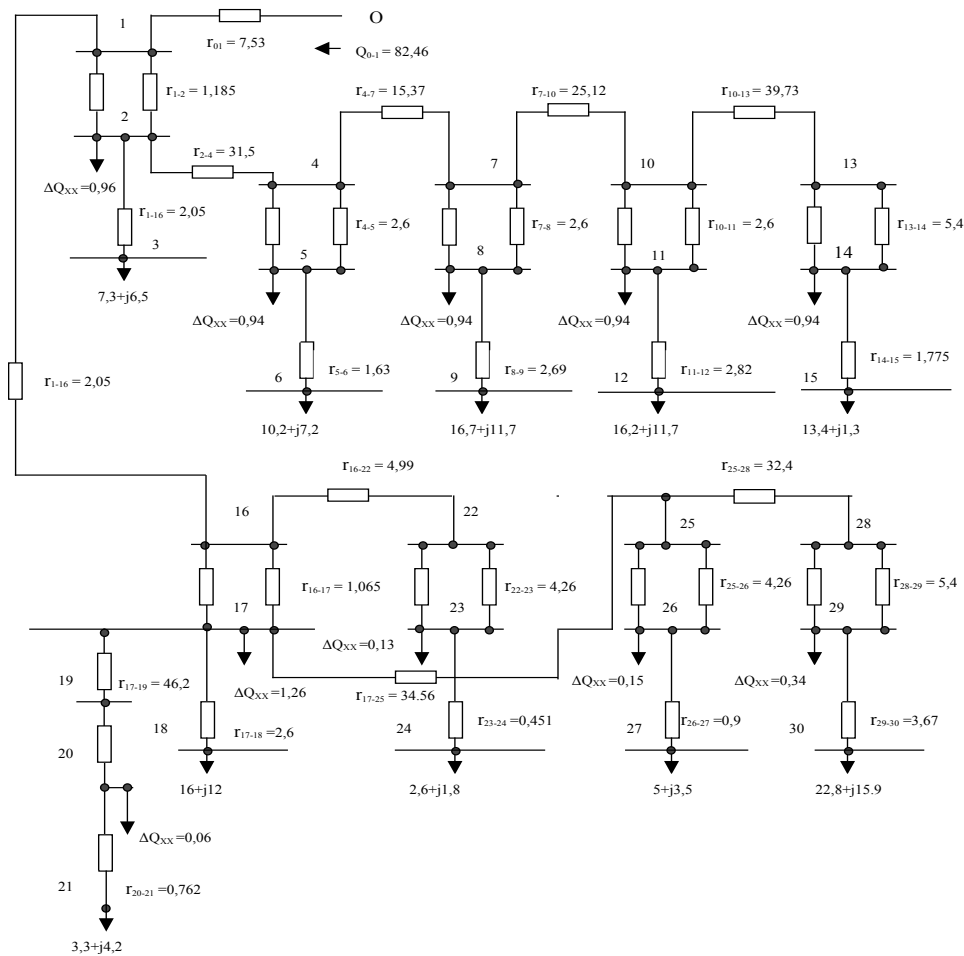


Рис. 2. Схема заміщення мереж підсистеми

Мережі окремих споживачів представлені еквівалентними активними опорами, які приведені до базисної напруги 220 кВ. Найбільші навантаження споживачів передбачаються відомими і заданими на схемах — в мВА, напруга — в кВ, довжина ділянок — в км, опори — в Ом. Питомі затрати на КУ у вузлах представлені в [8]. Питома вартість втрат активної потужності $C_0 = 112$ грн/кВт, значення $K_0 = 2,32$. Навантаженнями у вузлах ЕС 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 18 і 20 є реактивні потужності холостого ходу трансформаторів.

Розв'язання:

Виконавши розрахунки за відповідними даними, отримаємо залежність (2) в такому вигляді:

$$Z_{П.Г.} = -1051,76a + 694,99a^2.$$

Критеріальний вираз для всіх мереж однаковий, що і є перевагою даного методу отримання оптимального значення ступеню компенсації реактивних навантажень. Звідки оптимальний ступень компенсації для даної мережі за виразом (6):

$$a_{\text{опт}} = 1 - \frac{338,215}{2 \cdot 694,99} = 0,757.$$

Визначимо допустимі відхилення ступеня компенсації, задавшись допустимим відхиленням граничних затрат на генерацію реактивної потужності $\delta Z_{П.Г.*} = 0,05$, що складає 5 % від оптимального (мінімального) значення. За виразами (9) отримаємо:

$$a_*^- = \frac{1}{1 + 0,05} = 0,952; \quad a_*^+ = 1.$$

Функція (1) буде оптимальною, якщо $a \in [0,952; 1]$. Отже, якщо вважати, що функція (4) є законом оптимального керування режимами електричних мереж за допомогою компенсуючих установок, то керування доцільно здійснювати в межах $0,952 \leq a \leq 1$, щоб досягнути максимального економічного ефекту від компенсації реактивної потужності в електричних мережах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенвассер Э. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. — Г.: Наука, 1981. — 464 с.
2. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчётов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 176 с.
3. Рогальський Б. С., Вознюк С. І. Обґрунтування необхідності і метод визначення оптимального ступеня компенсації реактивних навантажень в електричних мережах споживачів і енергосистем // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2001. — № 6. — С. 87—90.
4. Рогальський Б. С. Методи поетапного розрахунку компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем і споживачів // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2001. — Вип. 6. — С. 22—39.
5. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Энергия, 1975. — 182 с.
6. Астахов Ю. Н., Лежнюк П. Д. Применение критерияльного метода в электроэнергетике. — Киев: УМК ВО, 1989. — 137 с.
7. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом. — Вінниця: УНІВЕРСУМ—Вінниця, 2003. — 131 с.
8. Рогальський Б. С. Компенсация реактивной мощности. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. I частина. Навчальний посібник. — Вінниця: 2002. — 119 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та електрозбереження

Надійшла до редакції 04.03.04
Рекомендована до опублікування 10.04.04

Рогальський Броніслав Станіславович — завідувач кафедри; **Кузьмінська Світлана Олександрівна** — аспірант.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження, Вінницький національний технічний університет