

УДК 621.311

**В. М. Пірняк; П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; О. Д. Демов, к. т. н., доц.;
Ю. Ю. Півнюк**

РОЗРАХУВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ЕКВІВАЛЕНТІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Показано, що економічні еквіваленти реактивної потужності вузлів електричної мережі (ЕЕРП) можна знаходити за допомогою коефіцієнтів розподілу втрат. Це дозволяє визначати ЕЕРП за схемою мережі та її параметрами, що відповідає фізичним умовам формування ЕЕРП.

Ключові слова: економічні еквіваленти реактивної потужності, електрична мережа.

Вступ

Уважають, що основним інструментом стимулювання впровадження установок компенсації реактивної потужності в електричній мережі споживачів є плата за реактивну енергію, яку визначають відповідно до “Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами” [1]. Цю плату визначають втратами активної енергії на передачу реактивної потужності мережами електропостачальної організації (ЕО) до споживача. При цьому мережі ЕО представляють еквівалентним джерелом реактивної потужності, яке характеризується економічним еквівалентом реактивної потужності (ЕЕРП).

З розвитком ринкових відносин в електроенергетиці постало завдання вдосконалення наявної методики. Цьому присвячено низку робіт, наприклад [2, 3]. Вони направлені на уточнення діючої методики та її спрощення. Метою цієї статті є визначення економічних еквівалентів реактивної потужності вузлів електричної мережі за допомогою коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках мережі. Це дозволяє визначати ЕЕРП за схемою мережі та її параметрами, що відповідає фізичним умовам формування ЕЕРП.

Постановка завдання

Існує низка методів визначення ЕЕРП. У [4] показано, що величину ЕЕРП можна визначити як:

$$D_i = \frac{d[\Delta P(Q_i)]}{dQ_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

де Q_i – поточне значення реактивного навантаження i -го вузла; $\Delta P(Q_i)$ – залежність втрат активної потужності, зумовлених реактивним навантаженням Q_i в мережах ЕО; n – кількість навантажувальних вузлів мережі.

Значення приросту функції $\Delta P(Q_i)$ при зміні Q_i на ΔQ_i можна визначати як

$$\delta P_i = D_i \Delta Q_i, \quad \text{якщо } \Delta Q_i \ll Q_{pi}, \quad (2)$$

де Q_{pi} – розрахункове реактивне навантаження i -го вузла.

Розрахунок величини δP_i , зумовленою навантаженням Q_{pi} , за формулою (1) дає велику похибку. Окрім того, у цьому випадку значення ЕЕРП D_i залежить від реактивних навантажень усіх вузлів мережі [4], що ускладнює розрахунок.

У [5] рекомендовано розраховувати середнє значення ЕЕРП:

$$D_{ic} = \frac{\Delta P_{pi}}{Q_{pi}}, \quad (3)$$

де ΔP_{pi} – втрати активної потужності, зумовлені навантаженням Q_{pi} .

Із формули (3) видно, що величина D_{ic} залежить від величини Q_{pi} . Тобто за різних значень Q_{pi} для одного й того ж вузла D_{ic} матиме різні значення. Це є недоліком цього підходу, оскільки ЕЕРП характеризує умови передачі потужності Q_i і не повинен залежати від значення цієї потужності.

Згідно з [6, 7] величину ΔP_i можна представити як

$$\Delta P_i = \sigma_i Q_i + \delta_i Q_i^2, \quad (4)$$

$$\text{де } \sigma_i = \frac{2}{U_i^2} \cdot (Q_1 R_{1i} + Q_2 R_{2i} + \dots + Q_{i-1} R_{i-1,i} + Q_{i+1} R_{i+1,i} + \dots + Q_n R_{ni}),$$

$$\delta_i = \frac{R_{ii}}{U_i^2} - \text{відповідно перша і друга похідні від функції втрат } \Delta P_i \text{ за змінною величиною } Q_i;$$

U_n – номінальна напруга мережі; R_{ii} – вхідний опір i -го вузла; R_{ij} – взаємний опір i -го та j -го вузлів ($j = \overline{1, n}$, $i \neq j$).

Недоліком цього підходу є також залежність характеристики σ_i від реактивних навантажень інших вузлів.

Отже, величина ЕЕРП i -го вузла, розрахована за наявними методами, залежить від реактивних навантажень цього вузла та інших вузлів. Це ускладнює розрахунок плати за реактивну енергію та її прогнозування споживачами. Зважаючи на це, наприклад, у [2] запропоновано взагалі відмовитися від ЕЕРП, а відносини між електропостачальником і електроспоживачем будувати, використовуючи відношення реактивної потужності до активної в контрольованих точках. Збільшення або зменшення тарифу за споживання реактивної потужності визначають за значенням відхилення фактичного значення $tg\varphi_o$ від нормованого значення $tg\varphi_n$.

Проте, якщо ЕЕРП залишається в користуванні, доцільно вдосконалювати алгоритми його визначення. Один з напрямків – це повернутися до фізичного його значення. Величина D – це похідна, яку визначають як відношення приросту втрат активної потужності за зміни реактивної потужності. У [8] цю величину як питомі транспортні витрати потужності використовували для оцінювання і планування заходів щодо зменшення технологічних витрат потужності (електроенергії) в електричних мережах. Як коефіцієнт чутливості її використовують для визначення місця встановлення й потужності джерел реактивної потужності (ДРП) в електричних мережах. Визначати ЕЕРП можна, розраховуючи його за допомогою коефіцієнтів розподілу втрат [9].

Визначення ЕЕРП за допомогою коефіцієнтів розподілу втрат

Розглянемо можливість цього підходу для елементарної схеми, заступна схема якої зображена на рис. 1.

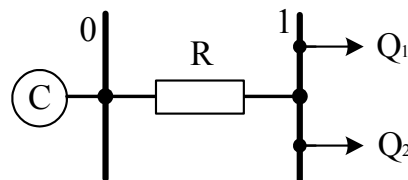


Рис. 1. Заступна схема розрахункової мережі: С – енергосистема

Знайдемо втрати, які створюють відповідно реактивні навантаження Q_1 і Q_2 :

$$\Delta P_1 = \Delta U_1 \cdot \frac{Q_1}{U_1}, \quad \Delta P_2 = \Delta U_2 \cdot \frac{Q_2}{U_1}, \quad (5)$$

де $\Delta U_1, \Delta U_2$ – спади напруги на ділянці 01 відповідно від протікання реактивних навантажень Q_1 і Q_2 ; U_1 – напруга у вузлі 1.

Якщо врахувати, що $\Delta U_{1*} = \frac{\Delta U_1}{U_1}$ і $\Delta U_{2*} = \frac{\Delta U_2}{U_1}$ – відносні спади напруги, то (5)

перепишемо як:

$$\Delta P_1 = \Delta U_{1*} \cdot Q_1, \quad \Delta P_2 = \Delta U_{2*} \cdot Q_2.$$

Останні вирази перепишемо з урахуванням коефіцієнтів розподілу сумарного навантаження $Q = Q_1 + Q_2$:

$$\Delta P_1 = \Delta U_{1*} \cdot c_1 \cdot Q; \quad \Delta P_2 = \Delta U_{2*} \cdot c_2 \cdot Q, \quad (6)$$

де $c_1 = \frac{Q_1}{Q}$ і $c_2 = \frac{Q_2}{Q}$.

Загалом втрати потужності в s -ій вітці від реактивної потужності i -го вузла можуть бути визначені:

$$\Delta P_{si} = \Delta U_{s*} \cdot c_{si} \cdot Q_i. \quad (7)$$

Оскільки величину $\Delta U_{s*} \cdot c_{si}$ визначають аналогічно коефіцієнту розподілу втрат t_{si} як елемент матриці **T** коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках електричної мережі від потужностей у її вузлах [9], то для розрахунку ЕЕРП можливо й доцільно використовувати метод розрахунку коефіцієнтів розподілу втрат. У цьому разі втрати, які створює навантаження Q_i в s -ій вітці електричної мережі, можна представити так:

$$\Delta P_{si} = t_{si} Q_i, \quad (8)$$

де t_{si} – si -ий елемент матриці коефіцієнтів розподілу втрат **T**.

З формули (8) видно, що коефіцієнт t_{si} показує частку втрат активної потужності в s -ій вітці від реактивного навантаження i -го вузла Q_i . Частку втрат ΔP_i в електричній мережі, зумовлену реактивним навантаженням Q_i , визначимо як:

$$\Delta P_i = Q_i \sum_{s=1}^m t_{si} \quad \text{або} \quad \Delta P_i = T_i Q_i, \quad (9)$$

де $T_i = \sum_{s=1}^m t_{si}$ – сума елементів i -го стовпця матриці **T** коефіцієнтів розподілу втрат потужності в мережі; m – кількість віток в електричній мережі.

Тобто $T_i = D_i$.

Розглянемо детальніше зв'язок матриці коефіцієнтів розподілу втрат з ЕЕРП. Матриця коефіцієнтів розподілу втрат для довільної електричної схеми має такий вигляд [9]:

$$T = U_y^T \cdot M_E \cdot C \cdot U_d^{-1}, \quad (10)$$

де U_y^T – транспонована матриця вузлових напруг мережі з вузлом балансу;

M_E – перша матриця з'єднань мережі з вузлом балансу; C – матриця коефіцієнтів струморозподілу; U_d^{-1} – обернена діагональна матриця вузлових напруг.

Матрицю коефіцієнтів струморозподілу для схеми з активними опорами визначимо як

[10]:

$$C = R_v^{-1} \cdot M^T \cdot (M \cdot R_v^{-1} \cdot M^T)^{-1}, \quad (11)$$

де R_v^{-1} – обернена діагональна матриця активних опорів віток мережі, M^T – транспонована матриця з'єднань мережі без вузла балансу.

Підставимо (11) в (10) і одержимо матрицю ЕЕРП :

$$D = T = U_y^T \cdot M_E \cdot R_v^{-1} \cdot M^T (M \cdot R_v^{-1} \cdot M^T)^{-1} \cdot U_d^{-1}. \quad (12)$$

Із формули (12) видно, що, на відміну від наявних методів [4 – 6], величини ЕЕРП не залежать від реактивних навантажень інших вузлів. Вони визначаються умовами передачі реактивної потужності (схемою, активними опорами елементів, напругою в вузлах мережі), що відповідає фізичним умовам формування втрат активної потужності від перетоків реактивної. Оскільки ці умови є прогнозованими, то це дозволяє прогнозувати й контролювати величини ЕЕРП і відповідно плату за реактивну енергію.

Приклад. Для мережі, заступна схема й параметри якої зображені на рис. 2, знайти сумарні втрати активної потужності і втрати, які створюються реактивними навантаженнями кожного вузла. При цьому використати ЕЕРП, знайдені на основі коефіцієнтів розподілу втрат потужності.

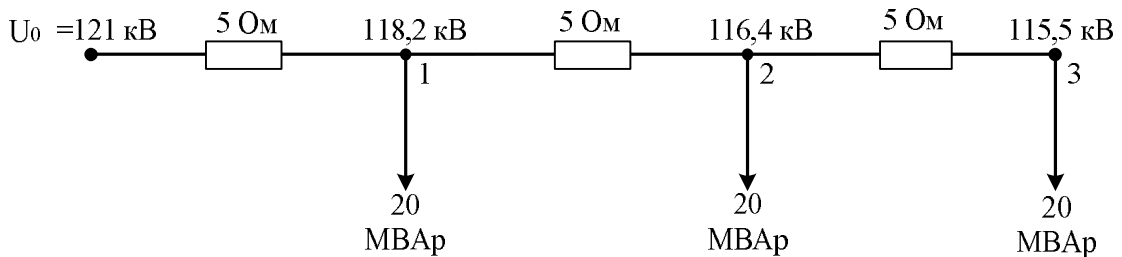


Рис. 2. Заступна схема розрахункової мережі

Розв'язування.

Відповідно до [10] знайдемо матриці M_E , M , Q , U_y , U_d , R_v :

$$M_E = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad Q = \begin{bmatrix} -20 \\ -20 \\ -20 \end{bmatrix}, \text{ MVar};$$

$$U_y = \begin{bmatrix} 118,2 \\ 116,4 \\ 115,5 \\ 121 \end{bmatrix}, \text{ кВ}; \quad U_d = \begin{bmatrix} 118,2 & 0 & 0 \\ 0 & 116,4 & 0 \\ 0 & 0 & 115,5 \end{bmatrix}, \text{ кВ}; \quad R_v = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}, \text{ Ом}.$$

Відповідно (12) знайдемо матрицю ЕЕРП:

$$D = \begin{pmatrix} 118,2 \\ 116,4 \\ 115,5 \\ 121 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}^T \times$$

$$\times \left(\begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}^T \right)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 118,2 & 0 & 0 \\ 0 & 116,4 & 0 \\ 0 & 0 & 115,5 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} -0,023 & -0,039 & -0,047 \end{pmatrix} \frac{\text{кВм}}{\text{квар}}.$$

Знайдемо втрати, створені відповідно реактивними навантаженнями першого, другого та третього вузлів, а також сумарні втрати:

$$\Delta P_1 = D_1 \cdot Q_1 = 0,023 \cdot 20 = 0,46 \text{ МВм}; \quad \Delta P_2 = D_2 \cdot Q_2 = 0,039 \cdot 20 = 0,78 \text{ МВм};$$

$$\Delta P_3 = D_3 \cdot Q_3 = 0,047 \cdot 20 = 0,94 \text{ МВм};$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 0,46 + 0,78 + 0,94 = 2,18 \text{ МВм}.$$

Знайдемо сумарні втрати в мережі класичним методом [6]:

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{1}{U_n^2} \cdot \sum_1^m Q_s^2 \cdot R_s = \frac{(60)^2}{115^2} \cdot 5 + \frac{(40)^2}{115^2} \cdot 5 + \frac{(20)^2}{115^2} \cdot 5 = 2,1 \text{ МВм},$$

де Q_s , R_s – відповідно реактивний потік у s -ій вітці мережі й активний опір цієї вітки.

Оскільки значення втрат, знайдених обома методами, практично збігаються, то ЕЕРП можна знаходити за допомогою коефіцієнтів розподілу втрат.

Висновки

1. Найвні методи розрахунку економічних еквівалентів реактивної потужності для одних вузлів мережі електропередавальної компанії залежать від реактивних навантажень інших вузлів, що ускладнює їх визначення і відповідно прогнозування плати за реактивну енергію.

2. Запропонований метод розрахунку економічних еквівалентів реактивної потужності ґрунтується на даних про схему мережі електропередавальної компанії та її параметри, відповідає фізичним умовам формування втрат активної потужності від перетоків реактивної й дозволяє прогнозувати плату за реактивну енергію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами / Міністерство палива та енергетики України. – К. – 2002. – 29 с. [затверджено наказом № 19 від 17.01.2002 р.]

2. Железко Ю. С. Новые нормативные документы, определяющие взаимоотношения сетевых организаций и покупателей электроэнергии в части условий потребления реактивной мощности / Ю. С. Железко // Новини енергетики. – 2008. – № 8. – С. 45 – 49.

3. Методика розрахунків плати за перетоки реактивної електроенергії та реактивну потужність між енергопостачальною організацією та її споживачами і суб'єктами оптового ринку електроенергії / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака, А. В. Праховник [та ін.] // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2009. – № 5. – С. 10 – 20.

4. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз / Д. Б. Банін, О. С. Яндульський, М. Д. Банін [та ін.] // Промелектро. – 2004. – № 1. – С. 22 – 33.

5. Рогальський Б. С. Економічні еквіваленти реактивної потужності (ЕЕРП) та їх використання / Наукові праці ВНТУ, 2013, № 3

- Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 126 – 129.
6. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Ф. Ф. Карпов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
7. Демов О. Д. Про розрахунок економічного еквівалента реактивної потужності / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук, І. О. Бандура, Ю. А. Григораш // Промелектро. – 2010. – № 1. – С. 3 – 6.
8. Экономия энергии в электрических сетях / [И. И. Магда, С. Я. Меженный, В. Н. Сулейманов и др.] ; под ред. Н. А. Качановой и Ю. В. Щербины. – К.: Техніка, 1986. – 167 с.
9. Лежнюк П. Д. Взаємовплив електричних мереж і систем / Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О. Б. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 122 с.
10. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей / Н. А. Мельников. – М.: Энергия, 1972. – 231 с.

Піряк Віктор Михайлович – заступник начальника.
Вінницька обласна інспекція Держенергонагляду.

Лежнюк Петро Дем'янович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем.

Демов Олександр Дмитрович – к. т. н., доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Півнюк Юрій Юрійович — магістрант кафедри електричних станцій та систем.
Вінницький національний технічний університет.