

УДК 621.311

**В. М. Пирняк; П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; А. Д. Демов, к. т. н., доц.;
Ю. Ю. Пивнюк**

РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЭКВИВАЛЕНТОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ УЗЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Показано, что экономические эквиваленты реактивной мощности узлов электрической сети (ЭЭРМ) можно находить с помощью коэффициентов распределения потерь. Это позволяет определять ЭЭРМ по схеме сети и ее параметрам, что соответствует физическим условиям формирования ЭЭРМ.

Ключевые слова: экономические эквиваленты реактивной мощности, электрическая сеть.

Введение

Считают, что основным инструментом стимулирования внедрения установок компенсации реактивной мощности в электрические сети потребителей является плата за реактивную энергию, которая определяется соответственно “Методике вычисления платы за переток реактивной электроэнергии между электропередающей организацией и ее потребителями” [1]. Эту плату определяют потерями активной энергии на передачу реактивной мощности сетями электроснабженческой организации (ЭО) к потребителю. При этом сети ЭО представляют эквивалентным источником реактивной мощности, который характеризуется экономическим эквивалентом реактивной мощности (ЭЭРМ).

С развитием рыночных отношений в электроэнергетике появилась задача совершенствования существующей методики. Этому посвящен ряд работ, например [2, 3]. Они направлены на уточнение действующей методики и ее упрощение. Целью данной статьи является определение экономических эквивалентов реактивной мощности узлов электрической сети с помощью коэффициентов распределения потерь мощности в ветках сети. Это позволяет определять ЭЭРМ по схеме сети и ее параметрам, что соответствует физическим условиям формирования ЭЭРМ.

Постановка задачи

Существует ряд методов определения ЭЭРМ. В [4] показано, что величину ЭЭРМ можно определить как:

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

где Q_i – текущее значение реактивной нагрузки i -го узла; $\Delta P(Q_i)$ – зависимость потерь активной мощности, вызванных реактивной нагрузкой Q_i в сетях ЭО; n – количество нагружающих узлов сети.

Значение прироста функции $\Delta P(Q_i)$ при изменении Q_i на ΔQ_i можно определять как

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

где Q_{pi} – расчетная реактивная нагрузка i -го узла.

Расчет величины δP_i , обусловленной нагрузкой Q_{pi} , по формуле (1) дает большую погрешность. Кроме того, в этом случае значение ЭЭРМ D_i зависит от реактивных нагрузок всех узлов сети [4], что осложняет расчет.

В [5] рекомендуется рассчитывать среднее значение ЭЭРМ:

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

где ΔP_{pi} – потери активной мощности, вызванные нагрузкой Q_{pi} .

Из формулы (3) видно, что величина D_{ic} зависит от величины Q_{pi} . То есть при разных значениях Q_{pi} для одного и того же узла D_{ic} будет иметь разные значения. Это является недостатком этого подхода, поскольку ЭЭРМ характеризует условия передачи мощности Q_i и не должен зависеть от значения этой мощности.

Согласно [6, 7] величину ΔP_i можно представить как

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

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

$\delta_i = \frac{R_{ii}}{U_i^2}$ – соответственно первая и вторая производные от функции потерь ΔP_i по переменной величине Q_i ; U_n – номинальное напряжение сети; R_{ii} – входное сопротивление i -го узла; R_{ij} – взаимное сопротивление i -го та j -го узлов ($j = \overline{1, n}$, $i \neq j$);

Недостатком этого подхода является также зависимость характеристики σ_i от реактивных нагрузок других узлов.

Таким образом, величина ЭЭРМ i -го узла, рассчитанная по существующим методам, зависит от реактивных нагрузок этого узла и других узлов. Это осложняет расчет платы за реактивную энергию и ее прогнозирование потребителями. Исходя из этого, например, в [2] предлагается вообще отказаться от ЭЭРМ, а взаимоотношения между электропоставщиком и электропотребителем строить, используя отношение реактивной мощности к активной в контролируемых точках. Увеличение или уменьшение тарифа за потребление реактивной мощности определяют значением отклонения фактического значения $\lg \varphi_o$ от нормируемого значения $\lg \varphi_n$.

Однако, если ЭЭРМ остается в пользовании, то целесообразно совершенствовать алгоритмы его определения. Одно из направлений – это вернуться к физическому его значению. Величина D – это производная, которую определяют как отношение прироста потерь активной мощности при изменении реактивной мощности. В [8] эту величину как удельные транспортные расходы мощности использовали для оценивания и планирования мероприятий по уменьшению технологических расходов мощности (электроэнергии) в электрических сетях. Как коэффициент чувствительности её используют для определения места установления и мощности источников реактивной мощности (ИРМ) в электрических сетях. Определять ЭЭРМ можно, рассчитывая его с помощью коэффициентов распределения потерь [9].

Определение ЭЭРМ с помощью коэффициентов распределения потерь

Рассмотрим возможность этого подхода для элементарной схемы, схема замещения которой изображена на рис. 1.

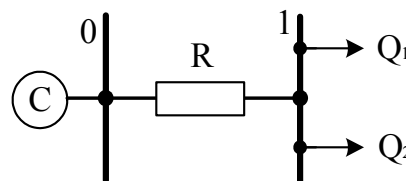


Рис. 1. Схема замещения расчетной сети: C – энергосистема

Найдем потери, которые создают соответственно реактивные нагрузки Q_1 и Q_2 :

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

где $\Delta U_1, \Delta U_2$ – потери напряжения на участке 01 соответственно от протекания реактивных нагрузок Q_1 и Q_2 ; U_1 – напряжение в узле 1.

Если учесть, что $\Delta U_{1*} = \frac{\Delta U_1}{U_1}$ и $\Delta U_{2*} = \frac{\Delta U_2}{U_2}$ – относительные потери напряжения, то (5)

перепишем как:

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

Последние выражения перепишем с учетом коэффициентов распределения суммарной нагрузки $Q = Q_1 + Q_2$:

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

где $c_1 = \frac{Q_1}{Q}$ и $c_2 = \frac{Q_2}{Q}$.

В общем виде потери мощности в s -ой ветке от реактивной мощности i -го узла могут быть определены:

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

Поскольку величину $\Delta U_{s*} \cdot c_{si}$ определяют аналогично коэффициенту распределения потерь t_{si} как элемент матрицы $\mathbf{T}$ коэффициентов распределения потерь мощности в ветках электрической сети от мощностей в ее узлах [9], то для расчета ЭЭРМ можно и целесообразно использовать метод расчета коэффициентов распределения потерь. В этом случае потери, которые создает нагрузка Q_i в s -ой ветке электрической сети, можно представить таким образом:

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

где t_{si} – si -ый элемент матрицы коэффициентов распределения потерь $\mathbf{T}$.

Из формулы (8) видно, что коэффициент t_{si} показывает долю потерь активной мощности в s -ой ветке от реактивной нагрузки i -го узла Q_i . Долю потерь ΔP_i в электрической сети, обусловленную реактивной нагрузкой Q_i , определим как:

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

где $T_i = \sum_{s=1}^m t_{si}$ – сумма элементов i -го столбца матрицы $\mathbf{T}$ коэффициентов распределения потерь мощности в сети; m – количество веток в электрической сети.

То есть $T_i = D_i$.

Рассмотрим детальнее связь матрицы коэффициентов распределения потерь из ЭЭРМ. Матрица коэффициентов распределения потерь для произвольной электрической схемы имеет следующий вид [9]:

$$\mathbf{T} = \mathbf{U}_y^T \cdot \mathbf{M}_E \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_d^{-1}, \quad (10)$$

где $\mathbf{U}_y^T$ – транспонированная матрица узловых напряжений сети с узлом баланса;

$\mathbf{M}_E$ – первая матрица соединений сети с узлом баланса; $\mathbf{C}$ – матрица коэффициентов

токораспределения; U_d^{-1} – обратная диагональная матрица узловых напряжений.

Матрицу коэффициентов токораспределения для схемы с активными сопротивлениями определяют как [10]:

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

где R_v^{-1} – обратная диагональная матрица активных сопротивлений веток сети, M^T – транспонированная матрица соединений сети без узла баланса.

Подставим (11) в (10) и получим матрицу ЭЭРМ:

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

Из формулы (12) видно, что, в отличие от существующих методов [4 – 6], величины ЭЭРМ не зависят от реактивных нагрузок других узлов. Они определяются условиями передачи реактивной мощности (схемой, активными сопротивлениями элементов, напряжением в узлах сети), что соответствует физическим условиям формирования потерь активной мощности от перетекания реактивной. Поскольку эти условия являются прогнозируемыми, то это позволяет прогнозировать и контролировать величины ЭЭРМ и соответственно плату за реактивную энергию.

Пример. Для сети, схема замещения и параметры которой изображены на рис. 2, найти суммарные потери активной мощности и потери, которые создаются реактивными нагрузками каждого узла. При этом использовать ЭЭРМ, найденные на основе коэффициентов распределения потерь мощности.

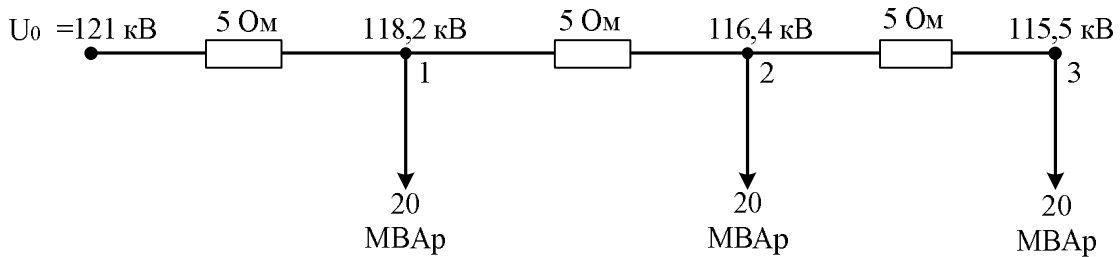


Рис. 2. Схема замещения расчетной сети

Решение.

В соответствии с [10] найдем матрицы M_E , M , Q , U_y , U_d , R_v :

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

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

Соответственно (12) найдем матрицу ЭЭРМ:

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

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

Найдем потери, созданные соответственно реактивными нагрузками первого, второго и третьего узлов, а также суммарные потери:

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

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

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

Найдем суммарные потери в сети классическим методом [6]:

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

где Q_s , R_s – соответственно реактивный поток в s -ой ветке сети и активное сопротивление этой ветки.

Поскольку значение потерь, найденных обоими методами, практически совпадают, то ЭЭРМ можно находить с помощью коэффициентов распределения потерь.

Выводы

1. Существующие методы расчета экономических эквивалентов реактивной мощности для одних узлов сети электропередающей компании зависят от реактивных нагрузок других узлов, что осложняет их определение и соответственно прогнозирование платы за реактивную энергию.

2. Предложенный метод расчета экономических эквивалентов реактивной мощности базируется на данных о схеме сети электропередающей компании и ее параметрах, соответствует физическим условиям формирования потерь активной мощности от перетоков реактивной и позволяет прогнозировать плату за реактивную энергию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 / 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.

Пирняк Виктор Михайлович – заместитель начальника.

Винницкой областной инспекции Госэнергонадзора.

Лежнюк Петр Демьянович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем.

Демов Александр Дмитриевич – к. т. н., доцент, доцент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.

Пивнюк Юрий Юриевич – магистрант кафедры электрических станций и систем.

Винницкий национальный технический университет.