

А. Д. Демов, к. т. н., доц.; О. В. Слободянюк; Д. А. Базалицкий

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОРМУЛЫ ТЕЙЛОРА ДЛЯ ДЕКОМПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В НИХ

*На основе формулы Тейлора предложена модель разделения функции снижения потерь на две составляющих: первая – снижение потерь активной мощности, вызванное действием отдельных конденсаторных установок; вторая – снижение потерь активной мощности, вызванное их общим действием, что позволяет проводить декомпозицию сети.*

**Ключевые слова:** декомпозиция сети, потери активной мощности, формула Тейлора.

**Постановка проблемы.** Уменьшения потерь электроэнергии в электрических сетях можно достичь за счет компенсации реактивной мощности (КРП) в них. Основой существующих методов расчета КРП в этих сетях является подход, который базируется на проведении таких расчетов для всей электрической сети одновременно [1, 2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Решать задачу таким образом сложно, поскольку:

- 1) электрическая сеть – это иерархическая система, в которой ее части могут принимать решение в соответствии со своими экономическими интересами отдельно от других частей;
- 2) решение задачи в целом нуждается в значительных затратах на сбор информации.

Следовательно, с одной стороны, возникают технико-экономические сложности расчета КРП одновременно для всей сети, а с другой – существует определенная независимость частей электрической сети при таком расчете.

Поэтому **цель работы** заключается в разработке методов разделения электрической сети при решении задачи КРП на части (декомпозиции электрической сети), что позволит упростить эту задачу.

**Материалы и результаты исследования.** Основным условием возможности декомпозиции является равенство показателей состояния КРП сети до декомпозиции и после нее [3]:

$$\alpha_{\Sigma}(Q_{Kl}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(Q_{Ki}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \alpha_{ij}(Q_{Kdi}, Q_{Kkj}), \quad (1)$$

где  $\alpha_{\Sigma}(Q_{Kl})$  – показатель состояния КРП для всей электрической сети, которое является функцией величины мощностей КУ  $Q_{Kl}$  при решении задачи без декомпозиции;  $l=1 \dots s$ ;  $s$  – количество узлов электрической сети, в которых установлены КУ;  $\alpha_i(Q_{Ki})$  – показатель КРП  $i$ -ой подсистемы, который является функцией величины мощности компенсирующих установок, установленных в  $i$ -ой подсистеме  $Q_{Ki}$ ;  $i, j = 1 \dots n$ ;  $n$  – количество подсистем электрической сети;  $\alpha_{ij}(Q_{Kdi}, Q_{Kkj})$  – показатель взаимовлияния  $i$ -ой и  $j$ -ой подсистем, который является функцией величин мощностей компенсирующих установок, установленных в  $i$ -ой и  $j$ -ой подсистемах  $Q_{Kdi}, Q_{Kkj}$ ;  $d_i=1 \dots h_i$ ;  $k_j=1 \dots h_j$ ;  $h_i, h_j$  – количества узлов соответственно  $i$ -ой и  $j$ -ой подсистемы электрической сети, в которых установлены КУ;  $\sum_{i=1}^n h_i = s$ .

Из (1) видно, что декомпозиция сети нуждается в декомпозиции функции показателя компенсации реактивной мощности. Таким показателем в большинстве случаев является снижение потерь активной мощности.

Рассмотрим декомпозицию функции снижения потерь, которая зависит от величины вектора снижения реактивных нагрузок  $\Delta Q = Q_1 - Q_2$  ( $Q_1, Q_2$  – соответственно векторы реактивных нагрузок сети до и после их снижения).

Изменение координат вектора  $Q_1$  на величину  $\Delta Q$  предопределяет снижение функции величины потерь от вектора реактивных нагрузок  $\Delta P(Q) = \frac{2}{U_n^2} \cdot Q^T \cdot R \cdot Q$  на величину  $\delta P(Q)$ , которую можно найти с помощью формулы Тейлора [4]:

$$\delta P(Q) = (\nabla P(Q_1))^T \cdot \Delta Q + \frac{1}{2} \cdot \Delta Q^T \cdot \nabla^2 \cdot (\Delta P(Q_1)) \cdot \Delta Q, \quad (2)$$

где  $\nabla P(Q_1)$ ,  $\nabla^2(\Delta P(Q_1))$  – соответственно вектор-столбец первых производных от функции  $\Delta P(Q)$  по переменным координат вектора реактивных нагрузок  $Q_i = \nabla^2(\Delta P(Q_1))$ , симметричная матрица вторых производных от функции  $\Delta P(Q)$  по переменным  $Q_i$ . Соответственно [2] матрицы  $\nabla P(Q)$  и  $\nabla^2(\Delta P(Q))$  для сети, заданной матрицей узловых активных сопротивлений  $R$ , находят как:

$$\nabla P(Q) = \frac{2}{U_n^2} \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & \dots & R_{1s} \\ R_{21} & \dots & \dots & R_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{s1} & \dots & \dots & R_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_s \end{bmatrix}; \quad \nabla^2(\Delta P(Q)) = \frac{2}{U_n^2} \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & \dots & R_{1s} \\ R_{21} & \dots & \dots & R_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{s1} & \dots & \dots & R_{ss} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $R_{ff}$  – входное сопротивление  $f$ -го узла;  $R_{fp}$  – взаимное сопротивление  $f$ -го и  $p$ -го узлов;  $U_n$  – номинальное напряжение сети;  $f, p = 1 \dots s; f \neq p$ .

Подставим (3) в (2) с учетом  $\Delta Q_f = Q_{Kf}$ ,  $\Delta Q_p = Q_{Kp}$  и получим:

$$\begin{aligned} \delta P(Q_K) &= \frac{2}{U_n^2} \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1s} \\ R_{21} & \dots & R_{2s} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{s1} & \dots & R_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_s \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} Q_{K1} \\ Q_{K2} \\ \dots \\ Q_{Ks} \end{bmatrix} + \frac{1}{U_n^2} \cdot \begin{bmatrix} Q_{K1} \\ Q_{K2} \\ \dots \\ Q_{Ks} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1s} \\ R_{21} & \dots & R_{2s} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{s1} & \dots & R_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{K1} \\ Q_{K2} \\ \dots \\ Q_{Ks} \end{bmatrix} = \\ &= \frac{2}{U_n^2} \cdot \left( \sum_{f=1}^s Q_{Kf} \cdot R_{ff} \cdot Q_f + \sum_{p=1}^s \sum_{f=1}^s Q_{Kf} \cdot R_{pf} \cdot Q_f + \frac{1}{2} \cdot \sum_{f=1}^s Q_{Kf}^2 \cdot R_{ff} \right) + \\ &\quad + \frac{1}{U_n^2} \cdot \sum_{f=1}^s \sum_{p=1}^s Q_{Kf} \cdot Q_{Kp} \cdot R_{fp}. \end{aligned} \quad (4)$$

Формула (4) отображает декомпозицию функции снижения потерь  $\delta P(Q_{Kf}, Q_{Kp})$  соответственно (1). Она делит эту функцию на две составляющие: первая – снижение потерь активной мощности, вызванное только мощностью  $Q_{Kf}$ ; вторая составляющая  $\delta P(Q_{Kf}, Q_{Kp})$  учитывает снижение потерь активной мощности, вызванное общим действием КУ  $Q_{Kf}$  и  $Q_{Kp}$ . Это позволяет проводить анализ уменьшения потерь, вызванный каждой КУ отдельно.

Рассмотрим возможность декомпозиции указанной функции при установлении КУ в

одном узле произвольной сети соответственно (4)

$$\delta P(Q_{kf}) = \frac{1}{U_n^2} \cdot \left( R_{ff} \cdot (Q_{kf} \cdot Q_f + Q_{kf}^2) + 2 \cdot Q_{kf} \cdot \sum_{\substack{p=1 \\ f \neq p}}^s Q_p \cdot R_{fp} \right). \quad (5)$$

Формула (5) выделяет из всей схемы сети ее часть (рис. 1), принимающую участие в расчете компенсации реактивной нагрузки  $f$ -го узла.

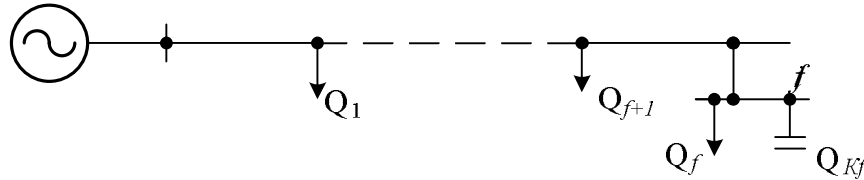


Рис. 1. Часть расчетной сети, принимающей участие в расчете компенсации реактивной нагрузки  $f$ -го узла

Используя формулу (4), выполним декомпозицию элементарной сети, схема замещения которой приведена на рис. 2, при установлении КУ в первом узле

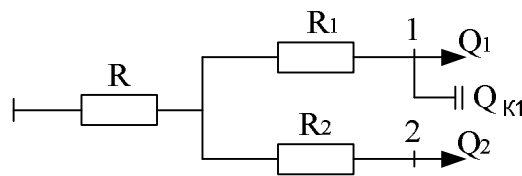


Рис. 2. Схема замещения элементарной сети:  $R$  – значение активного сопротивления питательной сети;  $R_1$ ,  $R_2$  – эквивалентные активные сопротивления сетей первой и второй частей электрической сети;  $Q_1$ ,  $Q_2$  – реактивные нагрузки соответственно первого и второго узла

Найдем функцию  $\Delta P(Q)$  и величину  $\delta P(Q_{K1})$  для сети, изображенной на рис. 2, соответственно формуле (2):

$$\begin{aligned} \Delta P(Q) &= \frac{1}{U^2} \cdot [(Q_1 + Q_2)^2 \cdot R + Q_1^2 \cdot R_1 + Q_2^2 \cdot R_2] \\ \delta P(Q_{K1}) &= \frac{2}{U^2} \cdot \left| \begin{matrix} R \cdot (Q_1 + Q_2) + R_1 \cdot Q_1 \\ R \cdot (Q_1 + Q_2) + R_2 \cdot Q_2 \end{matrix} \right|^T \cdot \left| \begin{matrix} Q_{K1} \\ 0 \end{matrix} \right| + \frac{1}{U^2} \cdot \left| \begin{matrix} Q_{K1} & 0 \end{matrix} \right| \cdot \left| \begin{matrix} R + R_1 & R \\ R & R + R_2 \end{matrix} \right| \cdot \left| \begin{matrix} Q_{K1} \\ 0 \end{matrix} \right| = \\ &= \frac{1}{U^2} \cdot (2 \cdot Q_{K1} \cdot (R \cdot (Q_1 + Q_2) + R_1 \cdot Q_1) + Q_{K1}^2 \cdot (2 \cdot R + R_1)) \end{aligned}$$

*Пример.* Используя разработанный метод декомпозиции, для сети (рис. 3), необходимо выбрать место установления КУ мощностью 50 квар, которое обеспечит максимальное снижение потерь. Считаем, что устанавливать КУ можно на стороне 0,4 кВ всех ТП.

На рис. 3 показаны основные параметры сети. Расчетные реактивные нагрузки заданы в кВАрах. В табл. 1 приведены величины активных сопротивлений элементов заданной схемы.

Таблица 1

Величины активных сопротивлений элементов схемы

| Название элемента на схеме          | ТМ 250 | ТМ 400 | ТМ 630 | Участки кабельных линий |      |      |      |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------|------|------|------|
|                                     |        |        |        | 10-9                    | 9-8  | 8-7  | 7-6  |
| Активное сопротивление элемента, Ом | 6      | 3,7    | 1,9    | 0,032                   | 0,73 | 0,05 | 0,13 |

Расчет проведем путем перебора всех возможных мест, где установлены КУ. Для каждого места установления определяем снижение потерь. Места установления КУ выбираем в том узле, который обеспечивает максимальное снижение потерь [5].

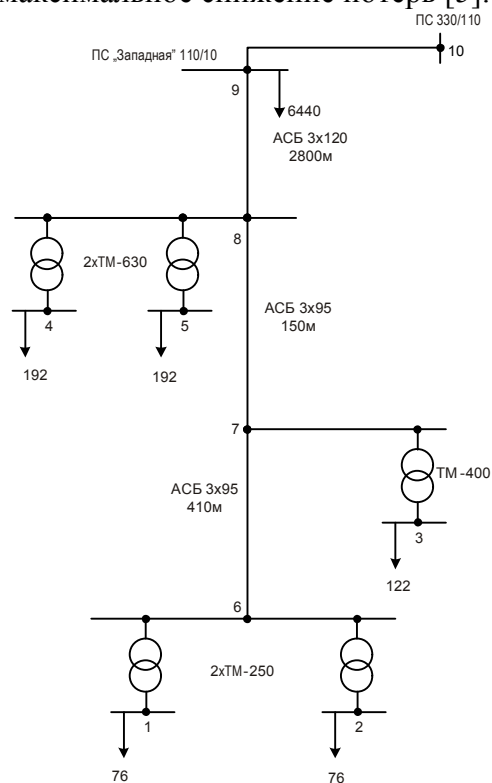


Рис. 3. Схема расчетной сети

При установлении КУ в 1-ом узле соответственно разработанного метода декомпозиции расчетная схема будет иметь вид (рис. 4), а снижение потерь активной мощности в расчетной сети определится как

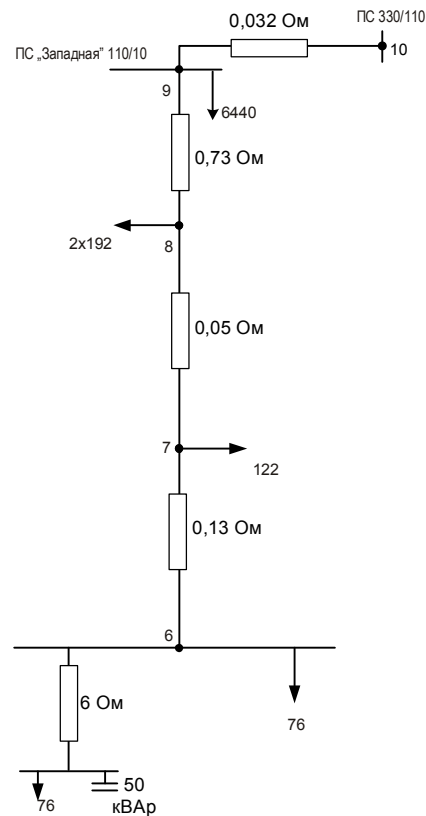


Рис. 4. Расчетная схема сети, полученная на основе декомпозиции

$$\begin{aligned}
 \delta(\Delta P)_{II} &= \frac{I}{U_H^2} \cdot [Q_{KV1} \cdot 2 \cdot (Q_2 \cdot (R_{6-7} + R_{7-8} + R_{8-9} + R_{9-10}) + \\
 &+ Q_3 \cdot (R_{7-8} + R_{8-9} + R_{9-10}) + Q_4 \cdot (R_{8-9} + R_{9-10}) + Q_5 \cdot (R_{8-9} + R_{9-10}) + Q_6 \cdot R_{9-10}) + \\
 &+ (R_{1-6} + R_{6-7} + R_{7-8} + R_{8-9} + R_{9-10}) \cdot (2 \cdot Q_1 \cdot Q_{KV1} - Q_{KV1}^2)] = \\
 &= \frac{I}{10^2} \cdot [50 \cdot 2 \cdot (76 \cdot (0,13 + 0,05 + 0,79 + 0,032) + 122 \cdot (0,05 + 0,79 + 0,032)) + \\
 &+ 192 \cdot (0,79 + 0,032) + 192 \cdot (0,79 + 0,032) + 6440 \cdot 0,032 + (6 + 0,13 + 0,05 + 0,79 + 0,032) \cdot (2 \cdot 76 \cdot 50 - 50^2)] = 903,542 \text{ (Вт)}.
 \end{aligned}$$

Аналогично находим величины  $(P)\delta\Delta_{ij}$  для других узлов:

$$\delta(\Delta P)_{I2} = 903,542 \text{ (Вт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{I3} = 960,45 \text{ (Вт)};$$

$$\delta(\Delta P)_{I4} = \delta(\Delta P)_{I5} = 933,06 \text{ (Вт)}.$$

Поскольку максимальное снижение потерь достигается при установлении КУ в третьем узле, то КУ мощностью 50 квар устанавливаем в этом узле.

### Выводы

1. На основе формулы Тейлора предложена модель разделения функции снижения потерь на две составляющих: первая – снижение потерь активной мощности, вызванное действием отдельных конденсаторных установок; вторая – снижение потерь активной мощности, вызванное их общим действием, что позволяет проводить декомпозицию сети.

2. При расчете компенсации реактивной мощности в электрической сети формула Тейлора позволяет выделить из всей схемы ту ее часть, которая принимает участие в этом расчете, и соответственно упростить этот расчет.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 200 с.
2. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Ф. Ф. Карпов. – М. : Энергия, 1975. – 184 с.
3. Демов О. Д. Декомпозиція функції втрат активної потужності в електричних мережах при розрахунок компенсації реактивної потужності / О. Д. Демов, О. П. Паламарчук // Вісник КДУ. – 2010. – № 3. – С. 117 – 120.
4. Реклейтис Г. Оптимизация в технике” В 2-х книгах. Книга 1 / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел; пер. с англ. В. Я. Алтаева, В. И. Моторина. – Москва : Мир, 1986. – 347 с.
5. Демов О. Д. Розрахунок поетапного впровадження конденсаторних установок в розподільні мережі енергопостачальних компаній при дефіциті коштів / О. Д. Демов, А. Б. Миндюк, І. О. Бандура // Новини енергетики. – 2011. – № 4. – С. 38 – 44.

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

*Слободянюк Олег Васильевич* – магистрант.

*Базалицкий Денис Анатолієвич* – студент.  
Винницкий национальный технический университет.