

УДК 621.311.031

Б. С. Рогальский, д. т. н., проф.; Ю. В. Грицюк; И. П. Сосенко

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В статье приведен усовершенствованный метод расчета компенсации реактивной мощности, позволяющий обосновать более высокие уровни КРН в электрических сетях энергосистем и потребителей электроэнергии.

**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности.

### Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций

В [1] приведены функции затрат на КРП:  
в сетях предприятия

$$Z = Z_{П.Г} \cdot Q_M (1 - \psi) + Z_{ПП1} \cdot Q_M \cdot \psi + \frac{Z_{ПП2} \cdot Q_M^2 \cdot \psi^2}{K_0}, \quad (1)$$

в сетях подсистемы

$$Z = \dot{Q}_n \cdot \dot{D} \cdot (1 - \Psi) + \dot{Q}_n \cdot \dot{П} \cdot \dot{R} \cdot \dot{C} \cdot \left( \dot{Q}_n \cdot \dot{П} \right)^t \cdot \Psi, \quad (2)$$

где  $Z_{П.Г}$  – средневзвешенные удельные затраты на генерацию реактивной мощности всеми КУ (компенсирующими установками), тыс. грн / МВАр;  $Z_{ПП1}$  – удельные затраты потребителя на реактивную мощность и энергию, которая потребляется из сети ЕС, тыс. грн / МВАр;  $Z_{ПП2}$  – удельные затраты на передачу реактивной мощности по сети, тыс. грн / МВАр<sup>2</sup>;  $Q_M$  – максимум реактивной мощности на вводе сетей потребителя, МВАр;  $\psi$  – входная реактивная мощность в относительных единицах ( $\psi = Q_e/Q_M$ ,  $Q_e$  – входная реактивная мощность в абсолютных единицах, МВАр; величина  $\psi$  – является переменной оптимизации функции (1));  $K_0$  – коэффициент отклонения фактического потокораспределения реактивной мощности от оптимального значения, при котором потери в сети минимальны (при  $K_0=1$ ), относительные единицы;  $Z_{ПП2} \cdot Q_M^2 \cdot \psi^2$  – затраты на передачу реактивной мощности по сети при фактическом потокораспределении (до компенсации) при том или другом значении  $\Psi$ , тыс. грн;  $\frac{Z_{ПП2} \cdot Q_M^2 \cdot \psi^2}{K_0}$  – минимально возможные затраты на

передачу реактивной мощности по сети (после компенсации) при условии, что КУ по узлам сети размещены оптимально (за критерием минимальных потерь) при решении балансовой задачи КРМ, тыс. грн;  $Z_{ПП1} \cdot Q_M \cdot \Psi$  – затраты потребителя на реактивную мощность и энергию, которые потребляется из сети энергосистемы, тыс. грн.  $\dot{Q}_n = (Q_{n1} \dots Q_{nn})$  – вектор-строка реактивных нагрузок узлов подсистемы, МВАр;  $\dot{D} = (Z_{n21} \dots Z_{nen})^t$  – вектор удельных расходов на генерацию реактивной мощности ее источниками в узлах сетей подсистемы, тыс. грн. / МВАр;  $\dot{П}$  – матрица путей;  $\dot{R}$  – диагональная матрица активных сопротивлений ветвей схемы замещения сетей подсистемы, Ом;  $\dot{C}$  – диагональная матрица коэффициентов  $C_i$  ( $i=1..n$ ).

Из уравнений (1) и (2) видно, что целевая функция (1) имеет составляющую, которая отображает затраты потребителя на потребление им реактивной мощности и энергии из сети

энергосистемы, а в функции (2) такая составляющая отсутствует. Это объясняется введением для потребителей с 1998 г. платы за реактивную энергию, а для энергопоставляющих компаний такая плата отсутствует [2]. Возникает вопрос, целесообразно ли отмеченную выше составляющую учитывать при системном расчете КРМ в сетях подсистемы, то есть в целевой функции (2). Если допустить положительный ответ на этот вопрос, то тогда, как определять стоимость потерь для сетей подсистемы, которая включает сети энергопоставляющих компаний и присоединенных к ней потребителей?

На стадии решения экономической задачи КРМ оптимальное распределение КУ и, соответственно, остаточное (недокомпенсированное) распределение реактивной мощности неизвестно, но есть возможность еще к решению экономической задачи определить  $K_0$  по формуле [1]:

$$K_0 = \frac{R_{e.в}}{R_e} \geq 1, \quad (3)$$

где  $R_{e.в}$  – эквивалентное активное сопротивление сети, определенное по фактическим потерям (до компенсации), Ом;  $R_e$  – эквивалентное активное омическое сопротивление сети, определенное путем последовательного ее эквивалентирования, Ом.

Величина  $R_{e.в}$  определяется по формуле [1]:

$$R_{e.в} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i^2 r_i}{Q_M^2}, \quad (4)$$

где  $Q_i, r_i$  – соответственно реактивная нагрузка и сопротивление  $i$ -го элемента сети, МВАр·Ом.

По условию  $\partial Z / \partial \psi$  получены оптимальные (за критерием минимальных затрат) значения входной реактивной мощности и суммарной мощности КУ в относительных и абсолютных единицах:

$$\psi_0 = \frac{(3_{П.Г.} - 3_{ПП1}) \cdot K_0}{23_{ПП2} \cdot Q_M}, \quad (5)$$

$$Q_{e.0} = \frac{(3_{П.Г.} - 3_{ПП1}) \cdot K_0}{23_{ПП2}}, \quad (6)$$

$$a_0 = 1 - \psi_0, \quad (7)$$

$$Q_{КУ.0} = Q_M - Q_{e.0}. \quad (8)$$

где  $a_0$  – степень или уровень компенсации реактивной мощности в электрической сети, в относительных единицах.

Уравнение (7) выплывает из условия баланса реактивной мощности на вводе электрической сети предприятия, а (6) – путем деления уравнения (7) на величину  $Q_M$ .

Анализ формул (4) и (5) показывает, что более интенсивное увеличение стоимости средств компенсации, сравнительно со стоимостью электроэнергии, приводит к уменьшению экономически обоснованного уровня КРМ ( $a_0$ ). И наоборот, наличие платы за реактивную энергию и увеличение стоимости потерь позволяет обосновать более высокий уровень КРМ.

**Цель статьи** – предложить усовершенствование к известному методу для повышения точности расчета КРМ и, соответственно, ее энергоэффективности.

### Основные материалы исследований

В последние 10 – 15 лет сложился диспаритет цен на средства компенсации (комплектные конденсаторные установки, приборы учета электроэнергии, коммутационная аппаратура) и

электроэнергию. Цены на электроэнергию контролируются государством (НКРЭ – национальной комиссией по регулированию электроэнергетики) и растут медленнее цен на средства компенсации. В результате сложилась парадоксальная ситуация: наиболее эффективная энергосберегающая технология в электрических сетях, которой является КРМ, часто оказывается экономически нецелесообразной. Создалась проблема экономического обоснования уровней КРМ в электрических сетях. Введение в целевую функцию (1) стоимости реактивной электроэнергии увеличивает экономически обоснованный уровень КРМ или уменьшает ВРМ (входную реактивную мощность), см. формулы (5 – 8).

Определение ВРМ и уровня КРМ по формулам (5) и (7) позволяет обосновать ее эффективность с позиции отдельного потребителя и уточнения в отдельных случаях системного расчета [1]. В то же время, использование системного подхода к расчету КРМ существенно повышает экономически обоснованный уровень КРМ (сети энергоснабжающей компании и присоединенные к ней потребители рассматриваются одновременно [3]). Логично прийти к выводу, что включение в функцию затрат на КРМ для ее системного расчета стоимости реактивной энергии для потребителя приведет к еще большему повышению экономически обоснованного уровня КРМ. При этом для системного расчета КРМ предлагается использовать функцию (1) как более простую при выполнении расчетов персоналом энергосистем и потребителей.

Следует отметить, что через недостаточную эффективность действующей методики расчета платы за реактивную энергию [2], Минтопэнерго Украины приняло решение о разработке новой редакции данной методики, в которой может быть реализовано предложение о взаиморасчетах между субъектами оптового рынка электроэнергии Украины. В таком случае стоимость потерь в сетях подсистемы предлагается определять по средневзвешенному тарифу по формуле:

$$T_{с.вз} = \frac{\Delta W_{\vartheta} \cdot T_{опт} + \Delta W_{сн} \cdot T_{роз}}{\Delta W_{\vartheta} + \Delta W_{сн}}, \quad (9)$$

где  $\Delta W_{\vartheta}, \Delta W_{сн}$  – соответственно – потери электроэнергии в сетях энергосистемы и присоединенных к ней потребителей, кВт / год;  $T_{опт}, T_{роз}$  – соответственно оптовый и розничный тариф на активную электроэнергию.

Введение в целевую функцию (1) коэффициента  $K_0$  позволяет учесть, еще на стадии решения экономической задачи, оптимизацию потоков реактивной мощности после компенсации (с помощью оптимального размещения КУ и управления ими). Другими словами, учитывать оптимизацию остаточных (недокомпенсированных) перетоков реактивной мощности ( $K_0$  введено в соответствии с требованиями [4]).

С другой стороны, введение в целевую функцию коэффициента  $K_0$  приводит к увеличению входной реактивной мощности ( $\psi_0$  и  $Q_{е.о}$ ) и, соответственно, уменьшению уровня КРМ ( $a_0$ ) и суммарной мощности КУ, которые надлежит установить в электрической сети ( $Q_{КУ}$ ). Если принять во внимание, что величина  $K_0$  может изменяться в основном в сетях от 1,05 до 2,0 и больше, то уменьшение экономически обоснованного уровня КРМ может быть существенным. В то же время уменьшение стоимости потерь (при наличии  $K_0$ ) от остаточных (после компенсации) перетоков реактивной мощности по абсолютной величине незначительно.

Для устранения отмеченного противоречия предложено коэффициент  $K_0$  в целевую функцию (1) не вводить, а использовать его при определении экономической и энергетической эффективности компенсации. С учетом отмеченных изменений математическая модель для решения экономической задачи КРМ будет выглядеть так:

$$\begin{cases} Z = Z_{П.Г} \cdot Q_M (1 - \psi) + Z_{ПП1} \cdot Q_M \cdot \psi + Z_{ПП2} \cdot Q_M^2 \rightarrow \min \\ Q_M = Q_{КУ} + Q_e \\ \psi_0 \leq 1, a_0 \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

При условии  $\partial Z / \partial \psi = 0$  получим оптимальные (за критерием минимальных затрат) параметры КРМ для сетей подсистемы (предприятия):

$$\psi_0 = \frac{(Z_{П.Г} - Z_{ПП1})}{2Z_{ПП2} \cdot Q_M},$$

$$Q_{e.o.} = \frac{(Z_{П.Г} - Z_{ПП1})}{2Z_{ПП2}}. \quad (11)$$

$$a_0 = 1 - \psi_0,$$

$$Q_{КУ.0} = Q_M - Q_{e.o.} \quad (12)$$

Значения параметра  $Z_{п.г}$  определяются по формуле приведенной в [1]. Параметры  $Z_{пп1}$  и  $Z_{пп2}$  предложено определять по формулам, соответственно, (тыс. грн / МВАр; тыс. грн / МВАр<sup>2</sup>):

$$Z_{ПП1} = 10^{-3} \cdot \frac{П1 + П2 - П3}{Q_M}, \quad (13)$$

$$Z_{ПП2} = \frac{T_{с.вз.} \cdot \tau \cdot R_{е.в}}{U_M^2}, \quad (14)$$

где  $П_1, П_2$  – основная и дополнительная платы за реактивную энергию, грн.;  $П_3$  – скидка с платы за реактивную энергию, грн. [2];  $\tau$  – число часов максимальных потерь электроэнергии, час.

Уточнение формул (11) и (12) предопределены установлением платы за реактивную энергию и определением удельной стоимости потерь активной электроэнергии от передачи реактивной в соответствии с действующей методикой [2].

Если в результате расчета окажется,  $\psi \geq 1$ , а  $a_0 \leq 0$ , то это значит, что КРМ в сетях данной подсистемы экономически нецелесообразна.

Заключительным и, в то же время, важным этапом расчета КРМ является определение ее экономической и энергетической эффективности. Собственно по результатам этого расчета принимается решение о ее внедрении.

Необходимость в уточнении метода оценивания эффективности КРМ вызвана изменениями в требованиях нормативных документов и в подходах к ее расчету.

В общем случае все возможные источники финансирования проектов КРМ могут быть разделены на две группы:

а) собственные средства (прибыли, накопления, амортизационные отчисления и другие виды активов предприятий, привлеченные средства из внутренних и внешних источников: продажа акций; средства, которые выделяются холдинговыми и акционерными компаниями, промышленно-финансовыми группами; из государственного и местного бюджетов, централизованных и внебюджетных средств);

б) заимствованные средства, в том числе кредиты, что предоставляются государством, кредиты иностранных инвесторов, облигационные заимствования, кредиты банков и других инвесторов – инвестиционных фондов и компаний, страховых организаций и компаний, страховых организаций и других; иностранные инвестиции в форме финансового и другого участия в разработке и реализации инноваций – прямых вложений, а также участия в уставном фонде совместных предприятий.

Отметим, что капитальные вложения в КРМ реализуются в течение одного года, то есть являются одновременными, за исключением тех случаев, когда имеют место ограничения

финансовых ресурсов.

В случае источников финансирования, которые относятся к группе "а", годовой экономический эффект предлагается определять по формуле:

$$E_p = 3_{III2} \cdot Q_m^2 \left( \psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0} \right) + 3_{III1} \cdot Q_m (\psi_\phi - \psi_0) + \Delta Z - 3_{III} \cdot Q_m (1 - \psi_0), \quad (15)$$

где  $\psi_\phi$  – входная реактивная мощность до компенсации (при отсутствии КРМ  $\psi_\phi = 1$ ), о.е.;  $3_{III2} \cdot Q_m^2 \cdot \psi_\phi^2$  – стоимость потерь до КРМ или до дополнительной КРМ, тыс. грн;  $3_{III2} \cdot Q_m^2 \cdot \psi_\phi^2 / K_0$  – стоимость потерь после КРМ или после дополнительной КРМ с учетом оптимизации остаточных потоков реактивной мощности, тыс. грн;  $3_{III1} \cdot Q_m \cdot \psi_\phi$  – стоимость потребления реактивной энергии с сети энергосистемы до компенсации или до дополнительной компенсации, тыс. грн;  $3_{III1} \cdot Q_m \cdot \psi_0$  – стоимость потребления реактивной энергии из сети ЭС после компенсации, тыс. грн.

Срок окупаемости капитальных вложений:

$$T_{ок} = \frac{3_{III} \cdot Q_m (1 - \psi_0)}{E_p}. \quad (16)$$

Снижение потерь:

- активной мощности (кВт)

$$\Delta P = \frac{10^{-3} \cdot R_{e.в.} \cdot Q_m^2}{U_n^2} \left( \psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0} \right); \quad (17)$$

- активной электроэнергии

$$\Delta W_0 = \frac{10^{-3} \cdot R_{e.в.} \cdot Q_m^2 \cdot \tau_{м.р}}{U_n^2} \left( \psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0} \right). \quad (18)$$

В случае источников финансирования, которые относятся к группе "б", при определении годового экономического эффекта, учитывается стоимость кредита (или других заимствований):

$$E_p = 3_{III2} \cdot Q_m^2 \left( \psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0} \right) + 3_{III1} \cdot Q_m (\psi_\phi - \psi_0) + \Delta Z - 3_{III} \cdot (1 + p) \cdot Q_m (1 - \psi_0), \quad (19)$$

где  $p$  – банковская кредитная ставка, в относительных единицах.

### Выводы

1. Уточнение целевой функции на компенсацию, определение удельной стоимости потерь электроэнергии метода оценки экономической и энергетической эффективности КРМ – позволяет обосновать более высокий уровень КРМ в электрических сетях потребителей и ЭС, и более точно оценить ее эффективность.

2. Предложен одинаковый метод расчета КРМ в сетях подсистемы и отдельного потребителя, тем самым отпадает необходимость в разработке разного для них программного обеспечения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогальський Б. С. Методи поетапного розрахунку компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем і споживачів, / Б. С. Рогальський // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2001. – Випуск 1. – С. 22 – 39.
2. Методика розрахунку плати за перетоки реактивної електроенергії між електропостачальною

організацією та її споживачами. – 1998. – Випуск 4. – С. 36 – 41.

3. Рогальський Б. С., Кузмінська С. О., Праховник А. В., Динесенко М. А., Божко В. М. Ще раз про визначення економічно доцільних обсягів споживання реактивної енергії // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2005. – №3. – С. 6 – 12.

4. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Промышленная энергетика. – 1991. – №7. – С. 51 – 55.

**Рогальський Бронислав Станіславович** – д.т.н., професор кафедри електротехнічних систем електропотреблення и енергетического менеджмента.

Винницький національний технічний університет.

**Грицюк Юрій Віталієвич** – асистент кафедри електрообладнання.

Луцький національний технічний університет.

**Сосенко Ірина Петрівна** – аспірант кафедри електротехнічних систем електропотреблення и енергетического менеджмента.

Винницький національний технічний університет.