

П. В. ВАСЮЧЕНКО, канд. пед. наук, доцент

И. Г. КИРИСОВ, ассистент

Т. И. ОВЧАРЕНКО, старший преподаватель

Кафедра «Электроэнергетика», Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

## ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*В статье рассмотрены вопросы компенсации реактивной мощности, экономическая целесообразность установки дополнительных источников реактивной мощности. Определены проблемы, которые возникают при компенсации реактивной мощности у различных потребителей.*

*У статті розглянуті питання компенсації реактивної потужності, економічна доцільність встановлення додаткових джерел реактивної потужності. Визначені проблеми, які виникають при компенсації реактивної потужності у різних споживачів*

### Введение

При современных условиях резкого повышения стоимости компенсирующих устройств при одновременном снижении электрических нагрузок промышленных предприятий (в 1,5–2 раза) и стоимости реактивной электроэнергии (в 1,5–2 раза), совершенно очевидно снижение эффективности компенсации реактивной мощности (КРМ).

В этих условиях необходимо экономически обосновать компенсацию реактивной мощности, т. е. определить экономически обоснованное значение входной реактивной мощности для режима максимальных активных нагрузок.

Однако установка батарей конденсаторов (БК) приводит к увеличению напряжения, которое может превосходить оптимальные значения на зажимах электроприёмников (ЭП), что сопряжено с некоторым увеличением потребляемой активной мощности. Это увеличение в ряде случаев может превосходить по величине уменьшения потерь в сети, вызванное КРМ, что отрицательно сказывается на энергосбережении.

Сложность проблемы КРМ в том, что одновременно решаются вопросы снижения потерь электроэнергии (ЭЭ) и регулирования напряжения в электрических сетях.

Комплексному решению этой задачи посвящена эта работа.

### Основная часть

Передача реактивной мощности (РМ) связана с потерями активной мощности в элементах электрической сети. Потери активной мощности, вызванные перетоками РМ, составляют:

$$\Delta P' = Q_p^2 \cdot R / U_n^2, \quad (1)$$

где  $Q_p$  – расчётная нагрузка узла;

$R$  – сопротивление элемента сети (трансформатора).

При наличии в узле нагрузки компенсирующих устройств (КУ) потери активной мощности снижаются на величину мощности этих устройств:

$$\Delta P'' = (Q_p - Q_{ку})^2 \cdot R / U_n^2. \quad (2)$$

Снижение потерь активной мощности вследствие снижения перетоков РМ составит:

$$\delta P = \Delta P' - \Delta P'' = (2Q_p \cdot Q_{ку} - Q_{ку}^2) \cdot R / U_n^2. \quad (3)$$

Последнее выражение свидетельствует о том, что снижение потерь активной мощности

зависит от степени КРМ, обозначаемой  $a = Q_{ку} / Q_p$ .

Анализируя зависимость изменения потерь активной мощности от степени КРМ, можно сделать вывод, что наибольшее снижение потерь активной мощности достигается при полной компенсации,  $a=1$ .

Это подтверждается последующей операцией: если в уравнение (2)[1] подставляем  $Q_{ку} = a \cdot Q_p$ , и получим:

$$\Delta P'' = Q_p^2 (1 - a^2) R / U_n^2 \quad (4)$$

Разделив уравнение (4) на (1) получим:

$$\Delta P'' / \Delta P' = (1 - a^2).$$

Изменение отклонения потерь  $\Delta P'' / \Delta P' = f(a)$  приведено на рис.1.

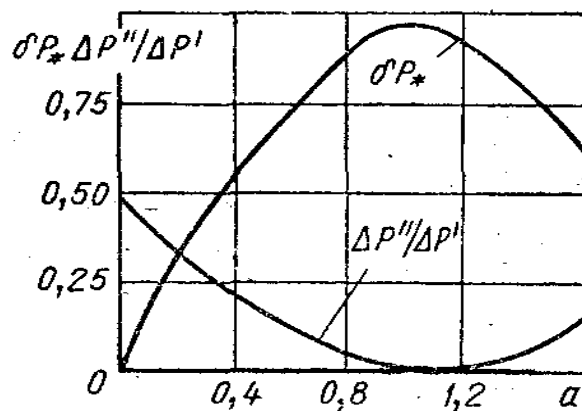


Рис. 1 Зависимость изменения потерь активной мощности в элементах электрических сетей  $\delta P_*$  и удельных потерь  $\Delta P'' / \Delta P'$  при различной степени компенсации реактивной мощности ( $a$ )

На рис.1 видно, что потери мощности при малой степени компенсации снижаются, а затем при увеличении ( $a$ ) отношение потерь  $\Delta P'' / \Delta P'$  уменьшаются до нуля и при  $Q_{ку} > Q_p$  (при  $a > 1$ ) увеличивается.

При полной КРМ ( $a = 1$ ) достигается максимальные значения потерь активной мощности в элементах сети. Таким образом, КРМ оказывает непосредственное влияние на потери мощности и энергии в элементах сети, а также используется как средство регулирования напряжения в узлах нагрузки.

Однако установка дополнительных источников реактивной мощности (ДИРМ) и регулирующих устройств связана с затратами на их приобретение, сооружение, эксплуатацию, а также на оплату потерь мощности и ЭЭ в этих установках. Поэтому не только перекомпенсация, но даже полная компенсация ( $a=1$ ) РМ нецелесообразна[2].

Установка ДИРМ целесообразна в том случае, если эффект снижения потерь мощности и ЭЭ при КРМ будет больше приведенных затрат, связанных с установкой и эксплуатацией компенсирующих устройств (КУ):

$$\Sigma \mathcal{E}_к = \mathcal{E}_{\delta p} - \mathcal{Z}_к > 0, \quad (5)$$

где  $\mathcal{E}_{\delta p}$  – эффект снижения потерь при КРМ, который определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_{\delta p} = \delta P \tau_p \beta', \quad (6)$$

где  $\delta P$  – снижения потерь активной мощности, кВт;  
 $\tau_p$  – время максимальных потерь (время протекания (PM), ч/год;  
 $\beta$  – стоимость 1 кВт·ч потерь ЭЭ, грн/кВт·ч;  
 $Z_k$  – затраты на установку и эксплуатацию компенсирующих устройств  
определяются выражением:

$$Z_k = Q_{ку} T_{MAX,ку} \beta_{ку}' \quad (7)$$

где  $Q_{ку}$  – мощность КУ, квар;  
 $T_{MAX,ку}$  – время эксплуатации КУ, ч/год;  
 $\beta_{ку}'$  – стоимость 1 квар·ч, полученного от КУ, грн/(квар·ч)).

Экономическая целесообразность КРМ оценивается уравнениями(6) и (7).  
Эффект снижения потерь мощности показан на рис.2 (кривая  $\Delta_{\delta P*}$ ).

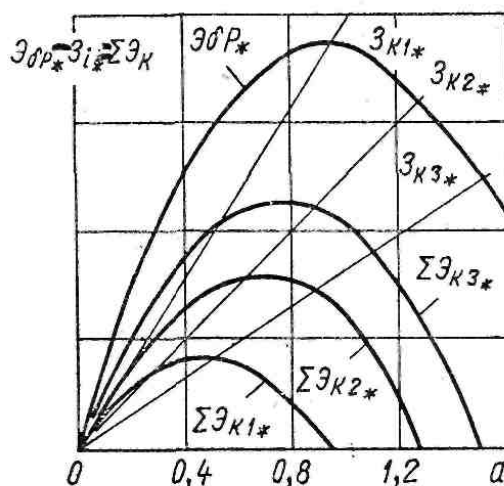


Рис. 2. Эффект снижения потерь мощности  $\Delta_{\delta P*}$  и суммарный эффект КРМ ( $\Sigma \Delta_{k1*}, \Sigma \Delta_{k2*}, \Sigma \Delta_{k3*}$ ) с учетом приведенных затрат на устройство компенсации ( $Z_{k1*}, Z_{k2*}, Z_{k3*}$ )

Анализ эффективности КРМ показывает, что максимальной экономической целесообразности использования КУ с различными приведенными затратами соответствует степень компенсации, всегда меньше единицы ( $a < 1$ ).

В современных условиях граничное значение  $\cos \phi$  для промышленных предприятий находится в пределах 0,97 ( $\tan \phi = 0,25$ ).

Мощность КУ, обеспечивающая максимальную эффективность компенсации, оценивается выражением[3]:

$$Q_{ку} = Q_p \cdot T_{MAX,ку} \cdot \beta_{ку}' \cdot U_n^2 / 2 \cdot R \cdot \tau_p \cdot \beta' \quad (8)$$

Это выражение позволяет определить мощность КУ  $Q_{ку}$ , которая при заданной (расчетной) PM  $Q_p$  обеспечит максимальную эффективность компенсации и дает возможность проанализировать режим напряжения в расчетном узле нагрузки и определить эффективность КРМ в современных рыночных условиях.

Как было сказано выше, установка БК в сетях потребителей приводит к снижению потерь ЭЭ в сети. Однако это не означает автоматического энергосберегающего эффекта, так как генерация батареями конденсаторов реактивной мощности вызывает повышение напряжения на зажимах ЭП, что приводит к некоторому увеличению потребляемой активной мощности. Это увеличение в ряде случаев может превосходить по величине уменьшение потерь в сети, что отрицательно сказывается на энергосбережении.

В режимах значительного электропотребления и высокой степени КРМ скорость роста потребления активной мощности с увеличением автоматически регулируемых БК практически прямо пропорциональна величине этой мощности, тогда как скорость уменьшения потерь в сети с увеличением степени КРМ падает. Эффективность работы БК с увеличением степени КРМ снижается. Поэтому стремление к полной КРМ не всегда оправдано.

В связи с тем, что КРМ может привести к увеличению потребления активной мощности, оплата дополнительно потреблённой активной ЭЭ может не компенсироваться снижением оплаты потреблённой реактивной электроэнергии (РЭЭ). Приобретение, установка, эксплуатация, управление БК напряжением 0,4 кВ требует значительных затрат, в силу чего использование БК для потребителей (в ряде случаев) может быть нецелесообразным[5].

При разработке КРМ следует также учитывать, что срок окупаемости затрат на установку регулируемых компенсирующих устройств (КУ) весьма высок (срок окупаемости регулирующего устройства реактивной мощности БК достигает 10 лет) и приближается к регламентируемому сроку их службы. В подобной ситуации не правомерно требование установки КРМ.

На таких предприятиях следует использовать дифференцированную по времени суток систему учёта ЭЭ с установкой в базовой части графика электрических нагрузок постоянно включённых БК и части батарей, отключаемых в период суток «ночь». Срок окупаемости установки нерегулируемых БК 1–1,5 года.

В настоящее время в связи с резким увеличением стоимости БК (стоимость БК возросла примерно в 10 раз) их мощность при расчёте компенсации с учётом увеличения напряжения и роста потерь после их установки обосновывается технико-экономическими расчётами.

Приведенные затраты на КРМ можно определить по выражению[4]:

$$Z = EK + B, \quad (9)$$

где  $K$  – стоимости установки БК, включая стоимость дополнительного оборудования и монтаж;

$E$  – нормативный коэффициент эффективности,  $E = 0,1$ ;

$B$  – годовые затраты, определяемые:

$$B = (a_p + a_э)K + \Delta P \cdot \beta \cdot T_{max} + \Delta p_{БК} \cdot \beta \cdot W_{ген.БК}, \quad (10)$$

где  $a_p$  – амортизационные отчисления на реновацию,  $a_p = 0,01$ ;

$a_э$  – отчисления на эксплуатацию,  $a_э = 0,08$ ;

$\Delta P = P_V - P_P$  – увеличение потребления активной мощности при увеличении напряжения при КРМ;

$\Delta p_{БК}$  – удельные активные потери в БК на 1 квар генерируемой РМ ( $\Delta p_{БК} = 0,0048$  кВт/квар БК НН);

$B$  – стоимость потерь активной ЭЭ, грн/кВт·ч;

$W_{ген.БК}$  – реактивная ЭЭ, генерируемая БК в сеть потребителя;

$T_{Max}$  – годовое число часов использования максимальной нагрузки  $P_{Max}$ .

Экономия ЭЭ, обусловленная снижением активных потерь при КРМ, определяется формулой:

$$\mathcal{E} = W_{ген.БК} \cdot \beta \cdot D, \quad (11)$$

где  $D$  – экономический эквивалент РМ,  $D = 0,087$  кВт/квар.

Экономический эффект при КРМ возможен при соотношении:

$$\mathcal{E} > 3. \quad (12)$$

Это соотношение возможно при  $Q_{Pmax} > Q_{БК}$ . Здесь  $Q_{Pmax}$  – максимальная расчётная реактивная нагрузка в узле.

Для проверки целесообразности КРМ проведём сравнение затрат на КРМ и экономию в связи с уменьшением активных потерь ЭЭ при использовании КУ при исходных данных:

$$P_{Pmax} = 400 \text{ кВт};$$

$$Q_{Pmax} = 300 \text{ квар};$$

$$W_{ген.БК} = 400000 \text{ квар} \cdot \text{ч};$$

$$Q_{БК} = 200 \text{ квар};$$

$$T_{max} = 3000 \text{ ч};$$

$$B = 0,15 \text{ грн/кВт} \cdot \text{ч};$$

$$K = 17000 \text{ грн.}$$

Первый вариант  $\Delta P = 0$

$$1. Z = 0,1 \cdot 17000 + (0,01 + 0,008) \cdot 17000 + 0,004 \cdot 0,15 \cdot 400000 = 2246 \text{ грн.}$$

$$2. \Delta = 0,087 \cdot 0,15 \cdot 400000 = 5220 \text{ грн. Так как } \Delta > Z \text{ КРМ целесообразна.}$$

Второй вариант задачи учитывает увеличение потерь активной мощности  $\Delta P = 10$  кВт при увеличении напряжения, вызванном КРМ:

$$1. Z = 0,1 \cdot 17000 + (0,01 + 0,008) \cdot 17000 + 10 \cdot 0,15 \cdot 3000 + 0,004 \cdot 0,15 \cdot 400000 = 6746 \text{ грн.}$$

$$2. \Delta < Z, \text{ компенсация нецелесообразна.}$$

### Выводы

1. Даже небольшое увеличение потребления активной мощности при повышении напряжения, вызванном КРМ, может привести к нецелесообразности КРМ. Поэтому вопрос КРМ следует решать одновременно с регулированием напряжения при КРМ.

2. Эффективность КРМ может быть достигнута применением автоматического регулирования компенсирующих устройств по напряжению при условии существенного изменения их стоимости.

### Список литературы

1. Синьков В. М. и др. Снижение технологического расхода электроэнергии в трансформаторных подстанциях. – К.: Техника, 1987. – С. 53–56.
2. Омельчук А. О., Козирский В. В. Компенсация реактивной потужності, як загальносистемна проблема // Промелектро. – 2004. – № 4. – С. 25–26.
3. Праховник А. В., Рогальский Б. С., Нанака О. М. Комплексне і системне вирішення проблеми компенсації реактивних навантажень в електричних мережах споживачів та електропостачальних компаній // Промелектро. – 2004. – № 2. – С. 29–30.
4. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. (затверджена наказом міністерства палива та енергетики України №19 від 17.01 2002 р.) // Офіційний вісник України, – 2002. – № 48. – 147 с.
5. Коваленко М. П., Денисюк С. П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України. – Київ.: ЧЕЗ, – 1998. – С. 425–427.

## FEASIBILITY STUDY OF REACTIVE POWER COMPENSATION UNDER OPERATION CONDITIONS

P. V. VASYUCHENKO, Candidate of Pedagogig, Associate Professor

I. G. KIRISOV, Assistant

T. I. OVCHARENKO, Senior teacher

*The paper considers the problems of reactive power compensation, economic feasibility of installation of additional sources of reactive power. It identifies the problems arising before different users when compensating reactive power.*

Поступила в редакцию 23.05 2013 г.