

КОМПЕНСАЦИЯ НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МОЩНОСТИ И СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ В СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С КОМБИНИРОВАННОЙ НАГРУЗКОЙ

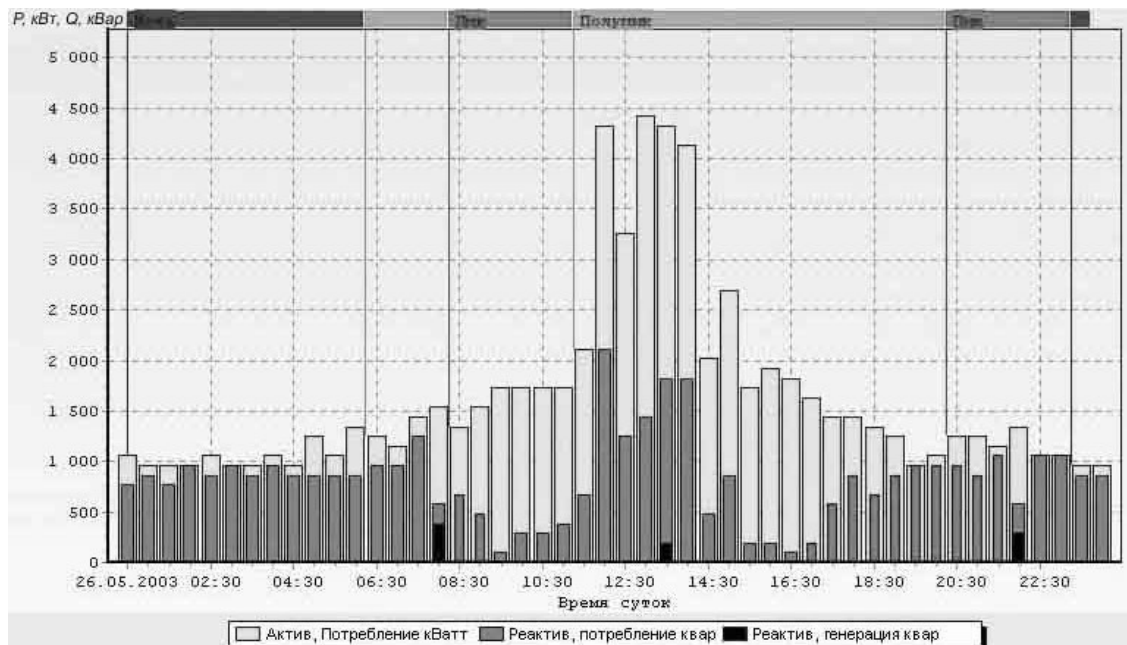


Рисунок 1 Суточный график потребления активной и реактивной мощности

Вступление. За последние годы в Украине разработан ряд нормативно-правовых документов, которые регламентируют потребление электроэнергии. С 1 февраля 2002 г. для промышленных предприятий действует система оплаты за потребленную активную и потребленную (генерируемую) реактивную энергию. Расчеты за потребление реактивной электроэнергии из сети энергоснабжающей организации и генерацию в ее сеть осуществляются:

- со всеми промышленными и приравненными к ним потребителями, с ж/д и городским электрифицированным транспортом, а также с перепродавцами электроэнергии;
- со всеми непромышленными потребителями, имеющими суммарное среднемесячное потребление активной электроэнергии по всем точкам учета более 30 тыс. кВт·ч.

Оплата, как правило, производится по показаниям многотарифных счетчиков активной и реактивной энергии в соответствии с методикой, изложенной в [1] и определяется тремя составляющими:

$$P = P_1 + P_2 - P_3,$$

где P_1 - основная плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии;

P_2 - надбавка за недостаточную оснащенность электрической сети потребителя КУ реактивных мощностей ($\cos \varphi$ предприятия менее 0,97);

P_3 - скидка платы за потребление и генерацию реактивной электроэнергии в случаях участия потребителя в оптимальном суточном регулировании режимов сети энергоснабжающей организации в расчетный период.

Данная система оплаты, несмотря на ряд недостатков, должна стимулировать предприятия к установке оборудования, уменьшающего перетоки реактивной мощности на участках разграничения балансовой принадлежности между предприятием и энергоснабжающей организацией.

В качестве примера на рис. 1 приведен суточный график потребления активной и реактивной мощности рудоремонтного предприятия Кривбасса. Из графика видно, что предприятие потребляет значительную реактивную мощность из энергосистемы.

Цель исследования. Основной целью исследования является комплексная оценка качества электроэнергии в сетях энергоснабжения типового промышленного предприятия и особенностей компенсации неактивных составляющих мощности.

Материал и результаты исследования. Известно, что на каждый установленный киловатт активной мощности экономически выгодна установка 0,6 кВАр реактивной мощности [2]. В то же время существующий уровень компенсации на предприятии составляет от 0,3 до 0,65 кВАр/кВт (зависит от распределения конденсаторных батарей (КБ) и обо-

рудования по вводам питающего напряжения). Рассмотрим вопрос компенсации реактивной энергии подробнее.

Проблеме компенсации реактивной мощности посвящено большое количество трудов, в которых методы расчета оптимальной мощности компенсирующих устройств (КУ) и их окупаемость отличаются по своей сложности, от простейших

$$Q_{КУ} = P_{ср} (tg\phi_{ср} - tg\phi_{н}), \quad (1)$$

$$O = \frac{C_{КУ}}{C_{гкэ}},$$

где $tg\phi_{ср}$, $tg\phi_{н}$ - соответственно, тангенсы угла сдвига фаз, соответствующие средневзвешенному коэффициенту мощности за год без применения КУ и нормативному коэффициенту мощности;

$C_{КУ}$ - стоимость КУ;

$C_{гкэ}$ - годовая стоимость компенсирующей реактивной энергии, до сложных, связанных с составлением матриц узловых активных сопротивлений и решением систем линейных или нелинейных уравнений. Сам же факт установки КУ не вызывает сомнений, однако на практике не уделяют достойного внимания проблемам энергосбережения и, в частности, проблеме компенсации реактивной мощности.

Например, на данном предприятии на питающей подстанции применена следующая схема электропитания (рис. 2).

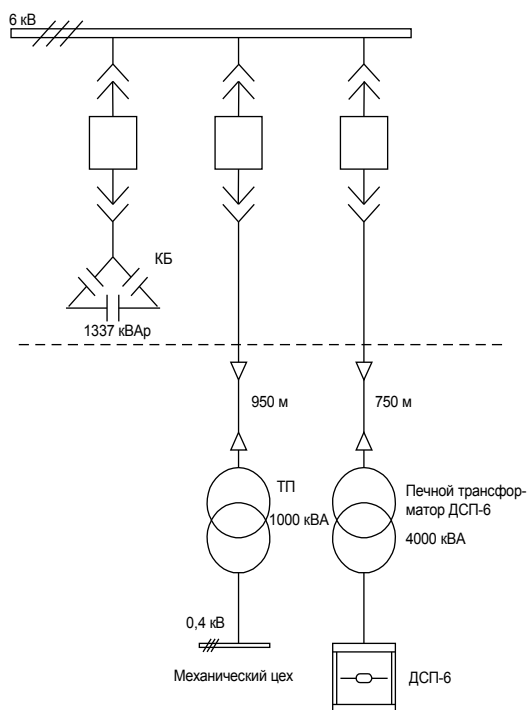


Рисунок 2 Схема питающей подстанции

К шинам напряжением 6 кВ присоединены нерегулируемая конденсаторная батарея (КБ) мощностью 1337 кВАр, дуговая сталеплавильная печь

ДСП-6, емкостью 6 т и печным трансформатором мощностью 4 МВА, а также трансформаторная подстанция (ТП) 6/0,4 кВ одного из механических цехов.

Нерегулируемая КБ рассчитана для повышения значения $\cos\phi$ до значения 0,95 при средней нагрузке питающей подстанции 6 кВ. Из-за резких колебаний реактивной мощности (от 0 до 3500 кВАр), вызываемых работой эл. печи осуществляется потребление или генерирование реактивной мощности в питающую сеть.

КБ включается лишь на период работы ДСП-6 с 11⁰⁰ до 17⁰⁰ и с 22⁰⁰ до 7⁰⁰ (время отключения КБ зависит от длительности плавки).

Основным видом потребителей электроэнергии механического цеха являются маломощные асинхронные двигатели, мощностью до 10 кВт. Парк установленных электродвигателей составляет порядка 200 машин, мощностью от 0,05 кВт (АОЛО11-4) до 40 кВт (А82-4). Коэффициенты мощности указанных электродвигателей при полной нагрузке соответственно равны 0,6 и 0,9.

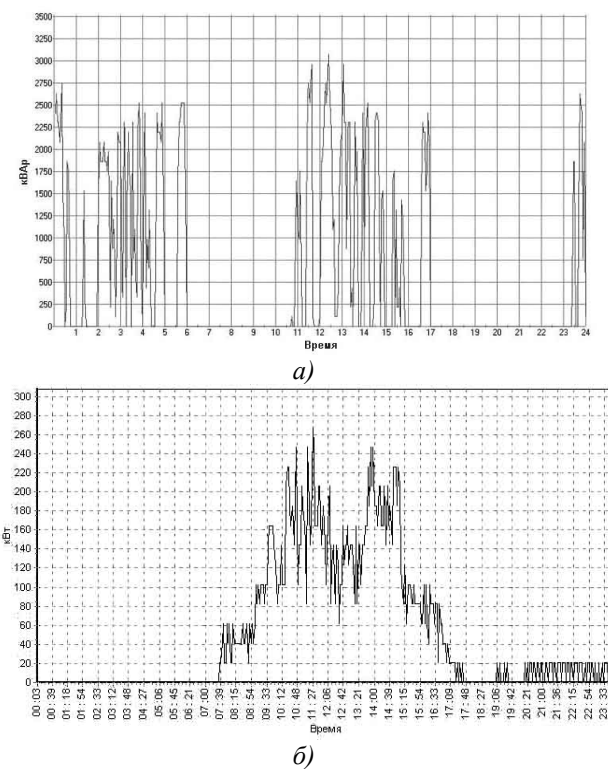


Рисунок 3 Суточный график потребления реактивной энергии эл. печью ДСП-6 (а) и график потребления активной энергии механическим цехом (б)

На рис. 3 приведены суточный график потребления реактивной энергии эл. печью ДСП-6 (а) и график потребления активной энергии механическим цехом (б).

Из приведенных материалов можно сделать вывод о существовании на предприятии неэффективных методов и средств повышения качества напряжения и необходимости проведения мероприятий по повышению качества электроэнергии.

В литературе, например [3], рассмотрены традиционные мероприятия повышения эффективности электроснабжения за счет борьбы с низким качеством напряжения в питающих сетях – применение синхронных машин, реакторов, использование отрицательного индуктивного сопротивления, рационализация схем электроснабжения, применение поперечной и продольно-емкостной компенсации, управляемых статических конденсаторов и т.д.

Как показывает практика эксплуатации систем электроснабжения, мероприятия по рационализации схем электроснабжения оказываются недостаточно эффективными – многие мероприятия требуют значительного усиления элементов системы. В работе [4] показано, что применение КУ является одним из наиболее эффективных и экономичных путей нормализации показателей качества электроэнергии.

На современном этапе для повышения качества напряжения при работе электрических печей перспективным является применение фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) на основе силового активного фильтра (рис. 4, а). Такое ФКУ обеспечивает компенсацию реактивной мощности любого знака и коррекцию формы сетевого тока [5].

В ряде случаев улучшение технико-экономических показателей ФКУ может быть достигнуто за счет комбинации фильтров высших гармонических и САФ. Одна из схем такого ФКУ приведена на рис. 4, б.

Основными приборами силовой электроники для применения в ФКУ являются тиристоры, запираемые тиристоры (GTO, IGCT) и силовые модули на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT.

Несмотря на очевидные достоинства тиристоров, они обладают существенным недостатком – невозможностью выключения по управляющему электроду. Поэтому это прибор в будущем будет вытеснен полностью управляемыми приборами: IGCT и IGBT.

Приборы IGCT в настоящее время обеспечивают диапазон коммутируемых напряжений до 4,5 кВ и токов до нескольких килоампер.

В области средних напряжений (500÷600 В и выше) наиболее предпочтительными для применения являются силовые модули на основе IGBT. В настоящее время IGBT обеспечивают коммутацию токов до 1800 А и напряжений до 4,5 кВ. Данные приборы вытесняют запираемые тиристоры в устройствах мощностью до 1 МВт и напряжением до 3,5 кВ.

Так как КБ, установленная на питающей подстанции, включается лишь на время работы ДСП, то в ТП необходима установка собственной КБ.

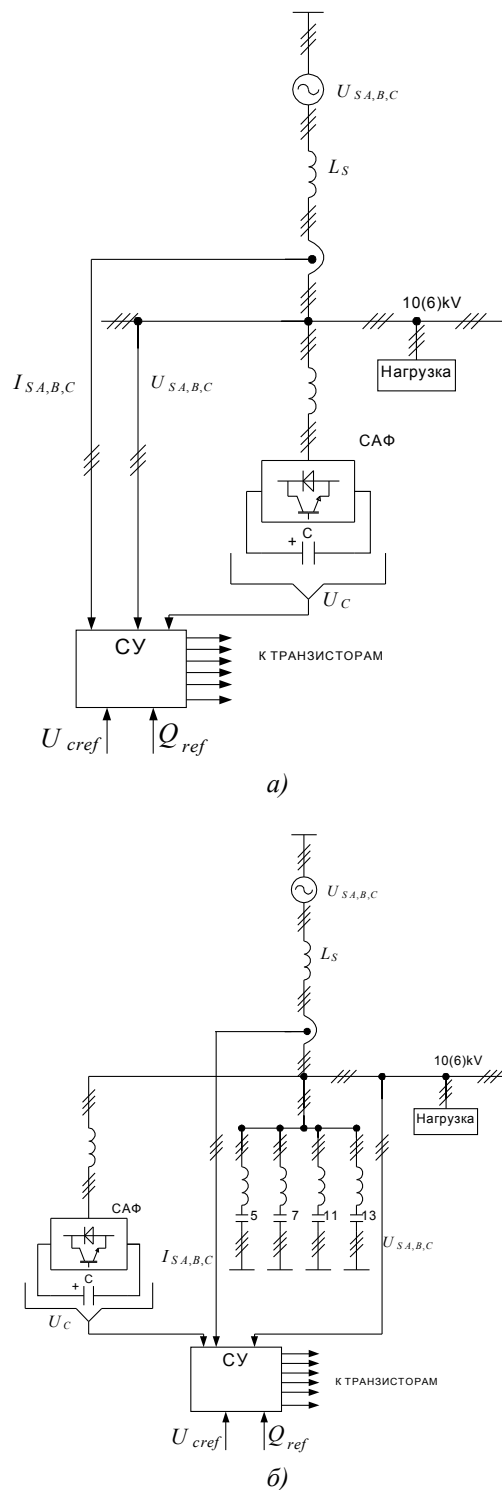


Рисунок 4 ФКУ на основе активного фильтра (а) и комбинации активного фильтра и фильтров высших гармонических (б)

Необходимая компенсация реактивной мощности может осуществляться при помощи КУ, присоединенных непосредственно к сетям 0,4 или 6 кВ, а также одновременно к сетям 0,4 и 6 кВ.

Наибольшая реактивная мощность, которая может быть передана со стороны 6 кВ в сеть 0,4 кВ без увеличения числа установленных трансформаторов определяется выражением [6]

$$Q_1 = \sqrt{(N\beta S_n)^2 - P^2},$$

где P – суммарная активная мощность, потребляемая на стороне 0,4 кВ;

S_n – номинальная мощность одного трансформатора;

N – число трансформаторов одинаковой мощности;

β – коэффициент загрузки трансформаторов.

При $N = 1$; $\beta = 0,27$; $S_n = 1000$ кВА; $P = 200$ кВт, мощность БК напряжением 6 кВ равна $Q_1 = 181,4$ кВАр.

Из выражения (1) следует, что для получения нормативного значения $\cos\phi = 0,97$, требуемая мощность БК для $P_{cp} = 200$ кВт составляет 126,2 кВАр.

Полученное значение реактивной мощности показывает, что мощности КУ, установленной на стороне 6 кВ, хватит для компенсации реактивной мощности.

При установке КУ, рассчитанного на компенсацию реактивной мощности в сети 0,4 кВ ТП, от реактивной мощности разгружаются не только питающие сети 6 кВ и выше, но и трансформатор 6/0,4 кВ.

Исчезнут также дополнительные потери активной мощности при передаче реактивной мощности в элементах электроснабжения. Потери в сетях, в зависимости от передаваемой мощности определяются следующими выражениями:

$$\Delta P = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_a + \Delta P_p,$$

где ΔP_a – составляющая потерь активной мощности от передачи активной нагрузки потребителя P ;

ΔP_p – составляющая потерь активной мощности от передачи реактивной нагрузки потребителя Q ;

U – напряжение сети;

R – эквивалентное сопротивление элемента электроснабжения.

Дополнительные потери напряжения

$$\Delta U_p = \frac{Qx}{U},$$

x – эквивалентное реактивное сопротивление элемента электроснабжения.

Реактивная мощность, потребляемая трансформаторами, соответственно составит при полной нагрузке:

$$Q_{пол} = S \frac{U_{к\%}}{100};$$

при нагрузке трансформатора, составляющей 50% номинальной:

$$Q_{50\%} = S \left(\frac{i_{0\%}}{100} + \beta_z \frac{U_{к\%}}{100} \right);$$

без нагрузки:

$$Q_{xx} = S \frac{i_{0\%}}{100},$$

где S – полная номинальная мощность трансформатора;

$U_{к\%}$ – напряжение короткого замыкания;

$i_{0\%}$ – ток холостого хода;

β_z – коэффициент загрузки, представляющий собою отношение тока вторичной обмотки при данной нагрузке к номинальному току вторичной обмотки трансформатора.

При работе КУ в режимах отклонения потребляемой реактивной мощности от среднего значения на шинах питающей подстанции будет наблюдаться нехватка или избыток реактивной мощности. При недокомпенсации (с 9^{00} до 11^{00}) реактивная мощность будет поступать из энергосистемы, при перекомпенсации повышается напряжение в электрической сети, что может вызвать повреждение всех чувствительных к изменению напряжения приборов и электрического оборудования (источников питания, осветительных ламп и т.д.). Необходимо также отметить, что изменение характера электрических нагрузок с индуктивного на емкостной проходит через режим, когда $\cos\phi = 1$. Данный режим может привести к возникновению процессов самовозбуждения в электрических двигателях, что может вызвать не только поломку оборудования, но и стать причиной несчастных случаев.

Поэтому целесообразно применять КУ с автоматическим регулированием, например по величине реактивной мощности, реактивного или полного тока, значению $\cos\phi$ или комбинации двух параметров регулирования с применением полупроводниковых приборов.

В настоящее время предприятия-производители компонентов систем компенсации реактивной мощности предлагают микропроцессорные регуляторы (МПР) автоматической корректировки коэффициента мощности. В качестве устройств коммутации применяются тиристоры или специальные контакторы.

Отметим, что секционирование КБ приводит к существенному увеличению установленной мощности КБ. При изменениях реактивной мощности от минимального до максимального значения, МПР в соответствии с установленным алгоритмом работы и временем реакции подключает соответствующие ступени КБ. Чем больше количество ступеней КБ, тем меньшее изменение реактивной мощности можно компенсировать, что в результате дает более высокую результативность работы установки. Следует учесть, что для подключения заряженного конденсатора, его необходимо разрядить, что снижает быстрдействие КУ.

Применение полупроводниковых приборов приводит к увеличению срока службы конденсаторов, т.к. под полным напряжением КБ находятся только при компенсации максимального значения потребляемой реактивной мощности. Учитывая, что долговечность работы конденсаторов зависит от величины напряжения на их зажимах обратно пропорционально 4-5 степени, то долговечность КБ по-

вышается более чем в 2 раза. Отсутствие механического и электрического износа контактов КУ существенно повышает долговечность и быстрдействие регуляторов.

МПР точно управляет коэффициентом мощности системы, выбирает режим оптимального использования конденсаторов, производит точную оценку величины тока, в том числе при искажениях формы кривой тока и напряжения, обеспечивает сбалансированное использование КБ посредством автоматического регулирования количества рабочих циклов и времени присоединения каждой ступени.

Кроме того, МПР может учитывать и жестко устанавливаемую компенсационную нагрузку (например, от трансформатора, освещения).

Данные расчета энергетической эффективности для ДСП и ТП до и после установки КУ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные значения потерь в электрических сетях

Мероприятия	$\Delta P_{\text{дсп}}$, кВт	$\Delta P_{\text{тп}}$, кВт	$\Delta Q_{\text{трансф. тп}}$, кВАр
До проведения мероприятий	36,4	0,5	28,7
После проведения мероприятий	5,9	0,3	20,5

Срок окупаемости КУ уменьшается с ростом установленной мощности и составляет для высоковольтных КУ от 1 до 3 лет и от 0,5 до 2 лет – для КУ низкого напряжения.

Выводы 1. Существующая система оплаты за потребленную активную и потребленную (генерируемую) реактивную энергию стимулирует предприятия к установке КУ с целью снижения перетоков реактивной мощности на участках разграничения балансовой принадлежности между предприятием и снабжающей организацией, т.к. организационные мероприятия, направленные на улучшение качества электроэнергии зачастую не приводят к получению желаемого эффекта, а затраты на проведение мероприятий по усилению элементов энергосистемы на порядок превышают затраты на установку КУ.

2. Для повышения качества питающего напряжения при работе ДСП целесообразно использовать ФКУ, а для механического цеха – регулируемую КБ, мощностью 130 кВАр с одновременной заменой трансформатора 1000 кВА, установленного в ТП на менее мощный 400 кВА.

ЛИТЕРАТУРА

1. “Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її

споживачами”. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 1 лютого 2002 р. за №93/6381.

2. Коваленко М.П., Денисюк С.П. Энергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / Відп. ред. Шидловський А.К. – Київ: УЕЗ, 1998. – 506с.

3. Рыжнев Ю.Л., Минеев Р.В., Михеев А.П. и др. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / Под ред. Смелянского М.Я. и Минеева Р.В. – М.: Энергия, 1975. – 184с.

4. Либкинд М.С. О качестве электрической энергии. – Стандарты и качество, 1979, №10, с. 31-32.

5. Домин И.Ф., Жемеров Г.Г., Сокол Е.И. Перспективы применения полупроводниковых компенсаторов реактивной мощности в сетях электроснабжения промышленных предприятий //Техническая электродинамика. – 2002, с.37-42.

6. Справочник по электропотреблению в промышленности / Под ред. Г.П. Минина и Ю.В. Копытова. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 496 с.