

СРЕДСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

А.С. Плехов

Доцент Нижегородского государственного технического университета

А.И. Зайцев

Профессор Воронежского государственного технического университета

Рассматриваются возможности применения дополнительных источников реактивной мощности, альтернативных статическим конденсаторам.

Оптимизация управления системами энергетики промышленных предприятий – это целенаправленное поддержание или обеспечение параметров режимов рассматриваемых систем в зависимости от возмущающих воздействий для получения максимума экономического эффекта.

Повышение коэффициента мощности электрических установок промышленных предприятий является составной частью проблемы повышения коэффициента полезного действия электрической системы и раскрытием внутренних резервов большого энергетического хозяйства.

Как известно, электроэнергия является единственным видом продукции, транспортировку которой осуществляют за счет расхода определенной части самой продукции, поэтому потери электрической энергии при ее передаче неизбежны.

Кроме этого «необходимого технологического расхода» во всех элементах системы электроснабжения возникают существенные дополнительные потери активной мощности и энергии, обусловленные загрузкой их реактивной мощностью, передаваемой потребителям по линиям электропередачи.

На создание реактивной энергии топливо практически не расходуется. Однако эта «обменная» энергия загружает электрические сети, отнимая некоторую часть их пропускной способности, приводит к дополнительным потерям активной энергии.

В то же время реактивная энергия легко может производиться непосредственно в местах, где она требуется, с помощью конденсаторных и других установок, генерирующих реактивную мощность емкостного характера, противоположную по знаку реактивной мощности индуктивного характера.

Экономическая целесообразность производства реактивной энергии на местах наступает в подавляющем большинстве случаев раньше, чем технические ограничения по ее передаче.

Экономически выгодная степень компенсации реактивной мощности в каждой точке сети определяется параметрами линий, соединяющих эту точку с источниками питания. Эти параметры индивидуальны для каждой точки и, следовательно, для каждого потребителя.

В задачу исследований в указанном направлении входит поиск дополнительных источников реактивной мощности, с помощью которых можно проводить компенсацию реактивной мощности непосредственно в месте потребления. Наибольший эффект снижения потерь активной энергии может быть достигнут при совмещении в отдельных установках генерации реактивной мощности и решении технологических задач. К числу таких установок в первую очередь относятся приводные синхронные двигатели, способные генерировать реактивную мощность емкостного характера в режиме перевозбуждения в определенных пределах.

Достижения в области силовой электроники открывают большие возможности по созданию регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока, в которых электродвигатели могут питаться от вентилярных преобразователей. Такие преобразователи с искусственной коммутацией могут сократить перетоки реактивной энергии, существенно уменьшить потери активной энергии в системе электроснабжения, улучшить электромагнитную совместимость с сетью [1, 2].

В связи с этим практически все регулируемые электроприводы на переменном и постоянном токе, получающие питание от управляемых выпрямителей на базе полностью управляемых вентилей (IGBT, GTO, IGCT), могут работать в режиме компенсации реактивной мощности, одновременно выполняя технологические функции. В этом случае все преобразователи по отношению питающей сети являются потребителями переменного тока.

Специфической особенностью генерации, распределения и потребления электрической энергии переменного тока является то, что наряду с активным сопротивлением токоприемников присутствуют их реактивные компоненты (индуктивности, емкости).

Предположим, что приемник, обладающий активными и индуктивными сопротивлениями, присоединен к источнику синусоидального напряжения $u = \sqrt{2}u \sin \omega t$ и потребляет синусоидальный ток $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi)$, сдвинутый по фазе относительно напряжения на угол φ . При этом предполагается, что характер нагрузки – линейный.

Мгновенная мощность на зажимах приемника определяется выражением

$$p = ui = 2UI \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi). \quad (1)$$

Первый член алгебраической суммы $UI \cos \varphi$ не зависит от времени, а второй – пульсирует с двойной частотой.

Среднее значение мгновенной мощности за период питающего напряжения T полностью определяется первым слагаемым

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi)] d\omega t = UI \cos \varphi + 0. \quad (2)$$

Эта величина, именуемая активной мощностью, характеризует энергию, выделяемую в единицу времени на производство полезной работы $P = UI \cos \varphi$.

Среднее значение от второго слагаемого мгновенной мощности равно нулю, т. е. на ее создание не требуется каких-либо материальных затрат, и поэтому она не может совершать полезной работы.

Передача значительного количества реактивной мощности по линиям и через трансформаторы системы электроснабжения невыгодна.

Как известно, мощность в начале линии $P_1 + jQ_1$ отличается от мощности в конце линии $P_2 + jQ_2$ на величину потерь мощности, активную и реактивную составляющие, которые определяют по выражениям

$$\Delta P = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} R = \Delta P_p + \Delta P_Q; \quad (3)$$

$$\Delta Q = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} X = \Delta P_p + \Delta P_Q, \quad (4)$$

где ΔP_p – потери активной мощности от активной составляющей тока;

ΔP_Q – потери активной мощности от реактивной составляющей тока.

Из этих уравнений следует, что потери как активной, так и реактивной мощности могут быть разделены на две составляющие, обу-

словленные потоками активной и реактивной мощности по линии.

Напряжение в начале линии U_1 связано с напряжением в ее конце U_2 соотношением

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U')^2 + \Delta U''^2}, \quad (5)$$

где $\Delta U'$ и $\Delta U''$ – продольная и поперечная составляющие вектора падения напряжения, определяемые по формулам

$$\Delta U' = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} = \Delta U'_p + \Delta U'_Q, \quad (6)$$

$$\Delta U'' = \frac{P_2 X + Q_2 R}{U_2} = \Delta U''_p + \Delta U''_Q. \quad (7)$$

Арифметическую разницу между напряжением в начале и конце линии называют потерей напряжения:

$$\Delta U = U_1 - U_2. \quad (8)$$

Для сетей обычно $X \gg R$, поэтому $\Delta U'$ определяется в основном слагаемым $Q_2 X$, а $\Delta U''$ – слагаемым $P_2 X$. Влияние $\Delta U''$ на U_2 мало, так как в (5) первое слагаемое подкоренного выражения значительно больше второго.

Поэтому уровни напряжения в узлах энергосистемы практически почти не зависят от передаваемой активной мощности и полностью определяются реактивной составляющей.

Приведенные соображения вынуждают, насколько это технически и экономически целесообразно, приближать источники реактивной мощности к местам ее потребления в сети. Это разгружает в значительной степени питающие линии электропередачи и трансформаторы от реактивной мощности.

Оптимальная величина коэффициента мощности на предприятии получается путем компенсации реактивной мощности как естественными мерами (за счет улучшения режима работы приемников, применения двигателей более совершенной конструкции, устранения недогрузки двигателя, трансформаторов), так и за счет установки специальных компенсирующих устройств (генераторов реактивной мощности) в соответствующих точках системы электроснабжения.

Наиболее целесообразным является такое размещение компенсирующих устройств, при котором обеспечивается минимум годовых расходов. При определении затрат следует учитывать, что, с одной стороны, установка компенсирующего устройства увеличивает годовые затраты за счет капиталовложений в это устройство и стоимость дополнительных потерь в нем, а с другой стороны, годовые затраты уменьшаются за счет снижения потерь активной энергии во всей цепи электроснабжения – от источника питания до места установки компенсирующего устройства вследствие компенсации реактивной мощности.

Современные системы электроснабжения (под этим термином понимаются все электрически связанные сети) относятся к классу больших систем с неполно заданной информацией.

Большое число узлов таких систем затрудняет совместный электрический расчет сетей всех напряжений, заставляет отказаться от классических способов их представления в виде схем с известной конфигурацией и заданными нагрузками и использовать различные способы их моделирования. Необходимость моделирования сетей, находящихся вне сферы деятельности организации, производящей расчет, обусловлена также дополнительными факторами организационного порядка, затрудняющими получение в полном объеме информации об их схемах и нагрузках. В этих случаях модели сетей необходимо строить по ограниченной информации обобщенного характера, которая, как правило, известна.

Решение задачи выбора мощности и мест установки КУ в описанных условиях возможно с помощью методов оптимизации больших систем [3]. Расчет, в котором одновременно учитываются сети всех напряжений общей системы электроснабжения, в дальнейшем называется системным расчетом. Используемая в таком расчете оптимизационная модель должна учитывать все технические и экономические факторы, существенные для сетей различных напряжений [4].

В соответствии с характерными условиями информационной обеспеченности расчетов и присущими особенностями режимов работы все сети могут быть разделены на пять групп [5]:

- 1) линии сверхвысокого напряжения (330 кВ и выше), возможности передачи реактивной мощности по которым определяются в основном техническими параметрами этих линий, а не требованиями приемной и передающей энергосистем;
- 2) межсистемные связи напряжением 220–110 кВ;
- 3) замкнутые сети 110 кВ и выше, не входящие в перечисленные выше группы;
- 4) разомкнутые сети 35–110 кВ;
- 5) сети 6–20 кВ и ниже.

Основной подсистемой являются замкнутые сети 110 кВ и выше, которые в системном расчете представляют обычной расчетной схемой. Остальные группы сетей заменяют предварительно рассчитанными моделями, параметрами которых являются потоки активной и реактивной мощности через граничные узлы с основной подсистемой.

Определение оптимальных графиков передачи мощности по линиям второй группы производится с целью выделения схемы рассматриваемой энергосистемы из схемы объединения энергосистем. Для получения таких графи-

ков необходимо каждую из связанных энергосистем заменить эквивалентным числом узлов n , равным числу связей с другими системами.

Модель каждой системы по отношению к граничным узлам может быть представлена в виде квадратичного полинома [5, 6]

$$Z_{M.C} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} Q_i Q_j + \sum_{i=1}^n b_i Q_i, \quad (9)$$

где Q_j — мощность основной системы;

Q_i — мощность, передаваемая в подсистему.

Коэффициенты аппроксимации a_{ij} и b_i получают методом наименьших квадратов по данным, предварительно полученным при варьировании реактивных нагрузок в узлах методом планирования эксперимента.

Модели разомкнутых сетей 35–110 кВ могут быть получены аналогичным путем. Однако в связи с тем, что каждая из этих сетей имеет лишь один узел с основной подсистемой, необходимость метода планирования эксперимента отпадает, и зависимость (9) получают непосредственно из решений балансовой задачи распределения различной суммарной мощности КУ. При этом модели сетей приобретают вид, аналогичный (9) с $n = 1$:

$$Z_{p.c} = a Q_{RP}^2 + b Q_{RP}, \quad (10)$$

где Q_{RP} — мощность, передаваемая из основной подсистемы в распределительную.

Затраты (10) могут быть выражены как через мощность, передаваемую через граничный узел Q_{RP} , так и через мощность конденсаторов в сети Q_K . Коэффициенты a и b функционально связаны с a_k и b_k зависимостями

$$a_k = a; \quad b_k = -(b + 2a Q_{RP}^*),$$

где Q_{RP}^* — начальное значение реактивной мощности, передаваемой через граничный узел.

Для сетей 6–20 кВ и ниже характерна наименее полная и достоверная информация. Ее уточнение дополнительно затрудняется в связи с различной ведомственной принадлежностью этих сетей. Вместе с тем большой объем информации не позволяет осуществить ее обработку централизованно [5].

В [6] предлагается учет этих сетей производить путем замены каждой сети эквивалентными сопротивлениями.

Функцию приведенных затрат с учетом способов оценки затрат на потери мощности и энергии ($Z_{П}$) и на конденсаторные установки (Z_K) можно записать в следующем виде:

$$Z = Z_{П} + Z_K = \sum_{i=1}^n [\Delta P_{\max i} a_i + \Delta W_i \beta_i] + Z_K Q_K \rightarrow \min \quad (11)$$

Оптимальное решение определим из уравнения

$$\frac{\partial Z}{\partial Q_K} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \Delta P_{\max i}}{\partial Q_K} a_i + \frac{\partial W_i}{\partial Q_K} \beta_i \right) + Z_K = 0. \quad (12)$$

Задачи максимальной экономии всех видов ресурсов и повышение качества промышленной продукции на современном этапе очень актуальны. В области электроэнергетики эти задачи сводятся к снижению потерь электроэнергии в сетях и повышению ее качества в точках потребления.

Наиболее эффективный способ снижения потерь — установка в сетях компенсирующих устройств. Требования по снижению потребления реактивной мощности стали предъявляться к потребителям практически с момента организации энергосистем.

Задача доведения степени компенсации реактивной мощности (КРМ) в сетях до экономически обоснованных значений может быть разделена на ряд подзадач, решаемых на различных иерархических уровнях.

С точки зрения оптимизации потерь электроэнергии в электрических сетях 110–750 кВ актуальной является задача поддержания уровня напряжения в заданных пределах (между верхней и нижней допустимыми границами) при переменном графике нагрузки энергосистем (в соответствии с ГОСТ 721–77) [7]. Таким образом, поддержанием определенного уровня напряжения в заданном диапазоне допустимых значений можно оптимизировать потери электроэнергии. Важным также является регулирование напряжения по концам магистральных или межсистемных линий электропередачи для исключения транзитного перетока реактивной мощности, что снижает нагрузочные потери в линии.

С государственной точки зрения, КРМ в разомкнутых электрических сетях 110 кВ и ниже всегда выгодна, поскольку уменьшает потребности в первичном топливе для электростанций. Однако в условиях новых рыночных отношений установка КРМ в собственных сетях потребителей не всегда им выгодна [3], и здесь экономическим стимулом должна быть система оплаты за перетоки реактивной мощности по сетям между энергоснабжающей организацией и потребителем.

При рыночной экономике критерием поведения каждого участника рыночной системы прежде всего являются собственные эгоистичные интересы. В условиях коммерциализации деятельности электроэнергетических компаний использовать понятие «разрешенной реактивной мощности» (в ранее известном смысле) было бы неправомерным. Поэтому необходима разработка иных подходов при решении задач КРМ, в наибольшей степени адаптированных к новым условиям.

Выбору мест установки компенсирующих установок должна предшествовать реализация организационных мероприятий, не требующих дополнительных капиталовложений.

Любые операции, связанные с перераспределением РМ в электрических сетях, следует проводить вместе с анализом, расчетом и оптимизацией режима напряжения. При этом должны быть обеспечены требования к показателям качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ 13109–97.

Регулируемые компенсирующие установки на базе выпрямителей с искусственной коммутацией могут оказаться достаточно эффективными для поддержания требуемых уровней напряжения (особенно в сетях с неоднородной нагрузкой или при ограниченных возможностях регулирования напряжения на шинах центров питания).

Кроме требований экономичности режимов, устанавливались и технические требования:

- поддержание уровней напряжения и частоты в сети, характер потребления электроэнергии (прокатные станы, дуговые сталеплавильные печи, электрифицированный транспорт, сварочные агрегаты);
- несимметрия нагрузки;
- искажение синусоидальности формы кривой напряжения.

Из полученных ранее уравнений (3), (4) видно, что все параметры режима работы сети зависят от активной и реактивной мощности.

Если для изменения активной мощности требуется изменение технологического режима работы потребителей энергии, то изменения реактивной мощности достигаются более просто — с помощью компенсирующих устройств (КУ). В свою очередь, установка дополнительных источников реактивной мощности связана с затратами средств на приобретение, доставку, монтаж и обслуживание как самих установок, так и дополнительного оборудования [5].

Существует ряд основных и вспомогательных способов компенсации реактивной мощности на предприятиях. В первую очередь при проектировании и эксплуатации рассматриваются и внедряются мероприятия, не требующие применения специальных компенсирующих устройств. По исчерпанию упомянутых мероприятий рассматриваются проектные решения по компенсации реактивной мощности, которые требуют применения специальных компенсирующих устройств.

Конденсаторные батареи

В настоящее время основным средством компенсации реактивной мощности на предприятиях являются батареи силовых конденсаторов, подключаемые параллельно к электросети (поперечная компенсация). Достоинства конденсаторных установок следующие: простота, относительно невысокая стоимость, не дефицитность материалов, малые удельные собственные потери активной мощности.

Конденсаторы являются наиболее экономичным источником реактивной мощности, так как имеют наименьшие потери по сравнению с другими источниками. Поэтому выгодно наиболее полное их использование во времени.

Недостатки конденсаторов: отсутствие плавного автоматического регулирования отдаваемой в сеть реактивной мощности, пожарная опасность, наличие остаточного заряда. Неблагоприятное влияние на работу конденсаторных установок оказывает наличие в их цепях высших гармоник [8, 9]. Поэтому при проектировании конденсаторных установок необходимо проверять вероятность наступления резонанса одной из высших гармоник, а иногда и резонанс на основной гармонике, могущей вызвать недопустимое увеличение тока в конденсаторной установке и ее повреждение. Такая проверка, в частности, необходима при размещении конденсаторов вблизи особенно активных источников высших гармоник: дуговых электропечей, выпрямительных установок, тяговых подстанций, электролизных установок.

Синхронные двигатели

Синхронные машины обладают рядом известных достоинств, которые обеспечили их применение для приводов механизмов большой и средней мощности, не требующих регулирования скорости вращения:

1. Главное преимущество синхронных двигателей (СД) заключается в возможности регулирования величины и изменения знака реактивной мощности. Синхронные машины обычно выполняются для работы с опережающим коэффициентом мощности, что позволяет компенсировать в определенных пределах реактивную мощность в питающей энергосистеме.

2. Синхронные машины имеют наиболее высокий коэффициент полезного действия из всех вращающихся электрических машин, который всегда выше, чем у асинхронных машин того же габарита. Это объясняется тем, что потери в стали синхронных машин всегда меньше, чем у асинхронных; потери в меди статора также меньше для синхронных машин вследствие более высокого значения коэффициента мощности, а остальные потери примерно равны.

3. Синхронные машины могут оказывать определенное положительное влияние на работу энергосистемы в целом, если обмотку возбуждения питать от компенсационного выпрямителя [10].

Поддержание требуемого режима как двигателя, так и питающей системы может быть осуществлено при помощи автоматического регулирования возбуждения СД в функции: напряжения, реактивной мощности, угла сдвига между током и напряжением, активного и полного тока статора и, наконец, в функции угла внутреннего сдвига осей поля статора и ротора.

В работе [11] дан глубокий анализ зависимости компенсирующего эффекта синхронного двигателя от тока возбуждения, напряжения на статорной обмотке.

Вентильные преобразователи с искусственной коммутацией

При широком применении мощных вентильных преобразователей переменного тока в постоянный возникла проблема компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразователями при естественной коммутации. С увеличением диапазона регулирования (угла управления) соответственно возрастает потребляемая реактивная мощность. Причем при режиме нагрузки, близкой к холостому ходу, потребляемая реактивная мощность максимальна.

Компенсация реактивной мощности, потребляемой глубоко регулируемыми преобразователями, традиционными средствами – батареями косинусных конденсаторов – затруднена, поскольку они, будучи включенными в сеть переменного напряжения параллельно преобразователю, работают, как правило, с перегрузками по току.

Источниками перегрузок конденсаторных батарей являются высшие гармоники в системе переменного тока, генерируемые преобразовательными устройствами. В большинстве случаев эти перегрузки возникают в режимах, близких к резонансным для какой-либо из гармоник порядка $n = 5; 7; 11; 13$ и т.д. Следовательно, компенсация реактивной мощности обычными средствами (с помощью косинусных конденсаторов, синхронных компенсаторов и синхронных двигателей) должна проводиться уменьшением высших гармонических путем установления резонансных фильтров или посредством увеличения числа фаз преобразователя.

Целесообразность применения искусственной коммутации вытекает из того, что компенсационный или компенсированный преобразователь позволяет отказаться от установки обычных средств компенсации, которые мало пригодны при работе с преобразовательными устройствами. Очевидно, что если имеется группа преобразователей, то целесообразно, чтобы часть из них были компенсационными, тогда коэффициент сдвига всей группы в целом можно привести к максимальному значению. Проведенное сравнение стоимостных показателей компенсационного преобразователя и преобразователя с естественной коммутацией с компенсирующим оборудованием (батареи косинусных конденсаторов) показывает, что уже при $\cos\varphi = 0,9$ по капитальным затратам первый выгоднее последнего.

В пользу компенсированного преобразователя свидетельствует то обстоятельство, что в

настоящее время нет средств, способных компенсировать пикообразное потребление реактивной мощности при резко переменном характере нагрузки преобразователей с естественной коммутацией, (например, прокатные станы). Подобные пики реактивной мощности невозможно скомпенсировать существующими средствами – батареями косинусных конденсаторов и синхронными компенсаторами. Только компенсированные выпрямители могут безынерционно компенсировать чрезвычайно большую скорость нарастания реактивной мощности до десятков и сотен МВАр [1, 12].

Литература

1. Зайцев А.И. Вариант решения проблемы энергосбережения в электроприводах постоянного тока металлургических агрегатов / А.И. Зайцев, А.С. Ладанов // *Сталь*. 2006. № 4. С. 81–83.
2. Зайцев А.И. Минимизация потерь электроэнергии в промышленном и сельскохозяйственном производстве / А.И. Зайцев, А.С. Плехов // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2008. № 2(10). С. 4–8.
3. Зорин В.В. Экономически обоснованные значения перетоков и степени компенсации реактивной мощности в сети потребителя / В.В. Зорин // *Электрика*. 2005. № 12. С. 13–17.
4. Кузнецов А.В. Об экономических рычагах управления режимами потребления реактивной мощности / А.В. Кузнецов, А.Т. Магазинник // *Электрика*. 2003. № 1. С. 17–20.
5. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю.С. Железко. — М. : Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
6. Железко Ю.С. О нормативных документах в области качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности / Ю.С. Железко // *Электрика*. 2003. № 1. С. 9–16.
7. Обязуев А.П. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности для электрических сетей и линий электропередачи / А.П. Обязуев, В.Н. Кочкин // *Современные методы и средства расчета нормирования и снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях : материалы междунар. науч.-техн. семинара*. — М. : ВНИИЭ, 2002. С. 5.
8. Крайчик Ю.С. Связь между реактивной мощностью вентильного преобразователя и искажениями формы напряжения на его вводах / Ю.С. Крайчик // *Электричество*. 1998. № 5. С. 71–73.
9. Зайцев А.И. Оценка возможных перенапряжений и токовых перегрузок в узлах нагрузки, влияющих на работоспособность конденсаторных установок / А.И. Зайцев, В.С. Бойчук, В.А.Сергеев, А.С. Плехов // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2008. № 1(9). С. 8–12.
10. Плехов А.С. Применение компенсационных выпрямителей для питания системы возбуждения синхронных двигателей / А.С. Плехов // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2008. № 3. С. 36–38
11. Сыромятников И.А. Синхронные двигатели / И.А. Сыромятников — М. : Госэнергоиздат, 1959.
12. Зайцев А.И. К вопросу об улучшении энергетических показателей тиристорных электроприводов металлургических агрегатов / А.И. Зайцев, А.С. Ладанов // *Промышленная энергетика*. 2006. № 7. С. 34–37.