

Активный компенсатор реактивной мощности как средство улучшения качества потребляемой энергии

Ю. М. КУЛИНИЧ, докт. техн. наук, профессор кафедры «Электроподвижной состав» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДвГУПС); В. К. ДУХОВНИКОВ, студент кафедры «Электроподвижной состав» ДвГУПС



Развитие силовой электроники и соответственно рост нелинейных потребителей электроэнергии обострили проблему обеспечения качества электроэнергии в плане нелинейных искажений токов и напряжений, а также общего уменьшения коэффициента мощности потребителей. Традиционно эта проблема решалась с помощью пассивных фильтров и фильтрокомпенсирующих устройств. Достижения силовой электроники по созданию нового поколения высокоэффективных, мощных, полностью управляемых GTO-тиристоров и IGBT-транзисторов позволяют решать эту проблему методами активного управления реактивной мощностью, включая мощность искажения.

В России используются следующие показатели качества электроэнергии (ПКЭ): отклонение напряжения, коэффициент несинусоидальности напряжения, отклонение частоты, длительность провала напряжения, импульсное напряжение, коэффициент n -й гармонической составляющей, коэффициент обратной и нулевой последовательности, размах изменения напряжения и доза колебаний напряжения. Все эти показатели должны находиться в пределах, нормированных ГОСТ 13109–97.

В зарубежных стандартах под качеством электроэнергии понимают не только сохранение значений параметров напряжения питающей сети в допустимых нормах, но и значения показателей потребляемого из сети тока. В международном стандарте качества электроэнергии IEEE 519-1992 ограничивают гармонический состав не только напряжения питания, но и потребляемого тока. Действительно, нельзя рассматривать вопрос качества электроэнергии только как влияние электросети на потребителя, необходимо оценивать все составляющие взаимовлияния системы «сеть–нагрузка». При этом следует учитывать основные причины, отражающиеся на значениях ПКЭ как со стороны источника электроэнергии, так и со стороны потребителя. Коэффициенты несинусоидаль-

ности и n -й гармонической составляющей напряжения зависят от искажений, вносимых током потребителей, подключенных к данному узлу системы. Несинусоидальные токи вызывают несинусоидальные падения напряжения на внутренних сопротивлениях сети. Поэтому к гармоническому составу тока потребителей предъявляются требования, зависящие от значения внутреннего сопротивления сети, которое определяется по отношению токов КЗ и номинального тока.

В новом российском ГОСТ 51317.3.2–99 [1] нормируются показатели энергии, связанные не только с напряжением, но и с потребляемым током. Этим стандартом ограничена величина максимально допустимых значений гармоник тока для потребителей с током до 16 А. Максимально допустимое значение третьей гармонической составляющей потребляемого тока для потребителей электроэнергии наиболее распространенного класса А (симметричных трехфазных технических средств и других, включая однофазные, видов технических средств) составляет 2,3 А, соответственно пятая и седьмая гармоники тока ограничены 1,14 и 0,77 А. Допустимые значения высших гармоник ($15 < n < 39$) определяются отношением $0,15 \frac{15}{n}$ А.

Оценим допустимую величину тока, потребляемую, например, неуп-

равляемым выпрямителем, которая удовлетворяет требованиям ГОСТ 51317.3.2–99. При близкой к прямоугольной (рис. 2а) форме потребляемого тока i_{nom} амплитудные значения составляющих его гармоник i_{km} рассчитываются по формуле [2]

$$i_{km} = \frac{4I_{max}}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots), \quad (1)$$

где I_{max} — амплитудное значение потребляемого тока.

Выразим амплитуду потребляемого тока I_{max} через действующее значение его первой гармоники I_1 . В соответствии с (1) амплитудное значение первой гармонической составляющей определяется как

$$i_{1m} = \frac{4}{\pi} I_{max}. \quad (2)$$

Действующее значение потребляемого тока связано с его амплитудным значением соотношением

$$I_1 = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} I_{max} \text{ или } \sqrt{2} I_1 = \frac{4}{\pi} I_{max}. \quad (3)$$

Подставляя правую часть последнего выражения в уравнение (1), получаем

$$i_{km} = \sqrt{2} I_1 (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots) \quad (4)$$

Перейдем в полученном уравнении от амплитудных i_{km} к действующим $i_k = i_{km} / \sqrt{2}$ значениям гармоник потребляемого тока:

$$i_k = I_1 (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots). \quad (5)$$

Подставляя в (5) допустимые значения i_k гармоник входного тока, найдем допустимую величину потребляемого тока $I_{доп}$. Расчетная формула может быть представлена в виде

$$I_{доп} = k i_k,$$

где k — номер гармоники входного тока.

В соответствии с формулой (6) при допустимом значении третьей гармоники потребляемого тока $i_k=2,3$ А, величина входного тока $I_{доп}$ не должна

превышать $3 \times 2,3 = 6,9$ А. Пятая и седьмая гармоники ограничивают потребляемый ток до 5,7 и 5,4 А соответственно. Чтобы высшие ($15 < k < 39$) гармоники потребляемого тока не превышали допустимых значений, действующее значение потребляемого тока не может быть больше 2,25 А. В противном случае органы Энергонадзора предъявляют значительные штрафные санкции к потребителям электроэнергии. Таким образом, допустимая величина потребляемого тока оказывается существенно ограниченной, что неприемлемо для большинства потребителей электроэнергии. Для выхода из этого положения необходимо улучшать форму потребляемого тока, приводя ее в соответствие с требованиями ГОСТ 51317.3.2–99.

Как следует из результатов анализа, наибольшее искажение в потребляемый ток вносят потребители коммерческого сектора (офисы), больницы и школы, т. е. такие нагрузки, которые содержат большое количество электронной техники с выпрямительными блоками питания. Это лампы дневного освещения, нагревательные устройства, компьютеры, кондиционеры и т. д. Отметим, что указанная техника наиболее чувствительна к качеству питающего напряжения. Для многих современных потребителей малой мощности более актуальна задача повышения коэффициента мощности в результате фильтрации потребляемого тока, а не уменьшения фазового угла первой гармоники, поскольку коэффициент искажения для этих видов нагрузки снижает коэффициент мощности больше, чем $\cos \varphi$.

Развитие элементной базы силовой электроники и новых методов высокочастотной модуляции привело к созданию в 70-х годах XX века устройств нового класса, улучшающих качество электроэнергии, — активных фильтров (АФ). Для компенсации реактивной мощности и снижения высших гармонических составляющих тока нагрузки предпочтительнее применение гибридных фильтров (ГФ), представляющих собой выгодную комбинацию пассивных и активных фильтров. При этом мощность активного элемента ГФ значительно снижается по сравнению с активным фильтром.

Для выбора структуры АФ промоделируем, например, работу неуправляемого выпрямителя, а также его работу при двух вариантах подключения к нему АФ: к вторичной и первичной обмотке трансформатора выпрямителя.

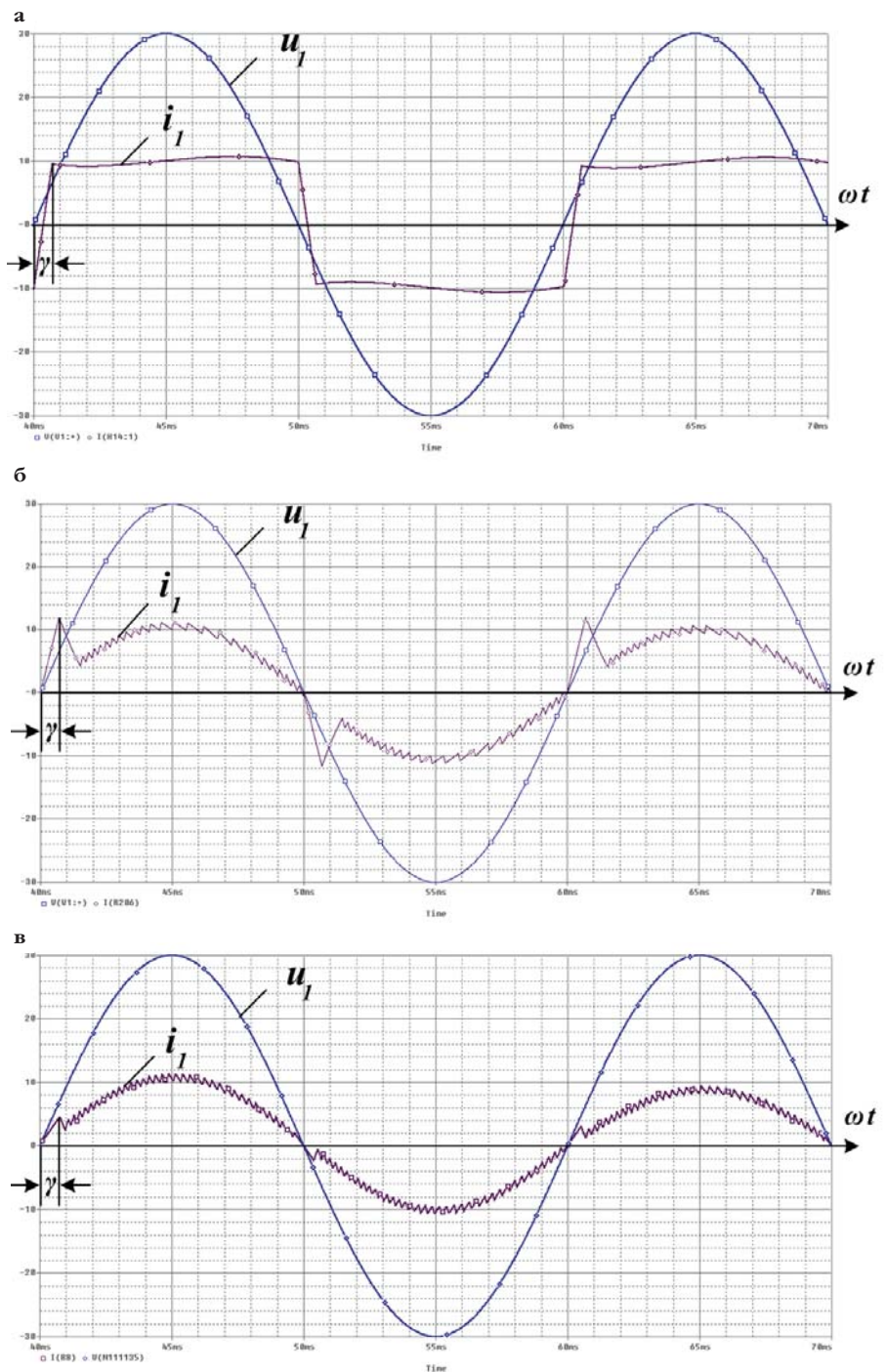


Рис. 1. Диаграммы входного тока и напряжения:
а — неуправляемый выпрямитель, **б, в** — при подключении активного фильтра к вторичной (**б**) и первичной (**в**) обмотке трансформатора

Результаты моделирования показаны на рис. 1, гармонические составляющие i_k входного тока выпрямителя — на рис. 2.

Из анализа рис. 1а следует, что при работе неуправляемого выпрямителя с параметрами цепи нагрузки $R_n = 5$ Ом, $L_n = 70$ мГн потребляемый ток i_1 имеет близкую к прямоугольной форму. Гармонический состав входного тока (рис. 2, линия 1) отличается наличием в нем высших гармонических составляющих нечетного порядка. Величины гармоник тока i_k примерно

соответствуют соотношению (5), т. е. амплитуда третьей гармоники тока примерно в три раза меньше основной гармоники 50 Гц, пятая — в пять раз и т. д.

При подключении АФ к вторичной обмотке трансформатора выпрямителя наблюдается значительное улучшение формы потребляемого тока (рис. 1б), которая становится близкой к синусоидальной. Отличие от синусоиды наиболее заметно в начале каждого полупериода напряжения, когда происходит коммутация вентиля

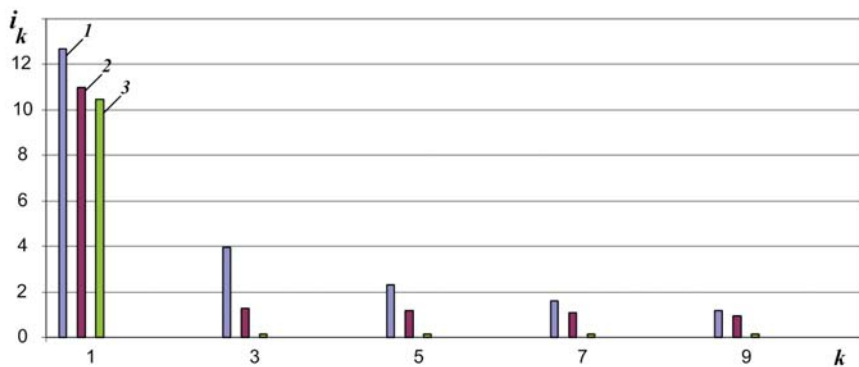


Рис. 2. Гармонический состав входного тока выпрямителя: 1 – неуправляемый выпрямитель, 2, 3 – при подключении активного фильтра к вторичной (2) и первичной (3) обмотке трансформатора

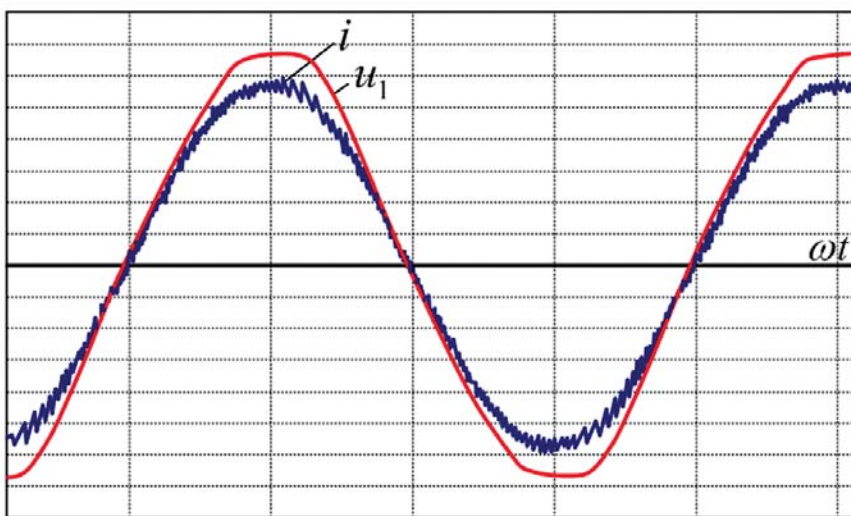


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований: u_1 — питающее напряжение, i — потребляемый ток

выпрямителя. В это время (интервал γ) выход фильтра закорочен цепью двух коммутируемых вентилей. Вследствие этого в выходной цепи АФ протекает ток короткого замыкания, ограниченный только параметрами согласующей индуктивности L_{σ} . Через некоторое время после окончания коммутации ток сети i_1 приближается к синусоидальной форме. При этом в нем остаются высокочастотные пульсации, связанные с работой АФ. На основании гармонического анализа входного тока (рис. 2, линия 2) преобразователя установлено, что, кроме преобладающей по величине первой гармоники сетевого тока 50 Гц, наблюдаются остающиеся достаточно высокими высшие гармонические составляющие тока. Их появление объясняется резким отклонением входного тока от синусоидальной формы во время коммутации вентилей выпрямителя.

В случае включения АФ в цепь первичной обмотки трансформатора выпрямителя (рис. 1в) потребляемый вып-

рямителем ток становится практически синусоидальным. В нем нет искажений тока, связанных с коммутацией в выпрямителе, и остаются только высокочастотные пульсации тока, обусловленные работой активного фильтра методом δ -модуляции. Величина высокочастотных пульсаций тока определяется величиной δ и параметром согласующей индуктивности L_{σ} . Гармонический состав потребляемого тока i_1 (рис. 2, линия 3) также свидетельствует о высокой эффективности работы фильтра этой конфигурации. В спектре тока практически нет высших гармонических составляющих, поэтому форма потребляемого из сети тока становится синусоидальной. Фаза потребляемого тока (рис. 1в) совпадает с сетевым напряжением, при этом можно говорить о достижении коэффициентом мощности значения 1.

Для подтверждения правильности принятых схемных решений в ДВГУПС разработано устройство компенсации реактивной мощности [3], позволяющее улучшить форму пот-

ребляемого тока и приблизить его фазу к питающему напряжению. Результаты работы устройства показаны на рис. 3. Из его анализа следует, что потребляемый из сети ток i имеет синусоидальную форму и совпадает по фазе с питающим напряжением u_1 . Благодаря полной компенсации реактивной мощности достигаются высокие энергетические показатели потребителя, в частности, значение коэффициента $k_m = \cos \varphi \cdot \nu \approx 1$.

Таким образом, на основе проведенного анализа различных структур АФ можно констатировать, что наиболее эффективная работа фильтра возможна в случае подключения его к первичной обмотке трансформатора выпрямителя. Такая конфигурация компенсатора оказывается практичной при работе с потребителями электрической энергии с напряжением 220 В. В этом случае компенсатор включается между сетью и потребителем и не требуется изменения конструкции устройства потребления энергии для внутреннего подключения к ним АФ.

Вместе с тем при подключении АФ к первичной обмотке понижающего трансформатора выпрямителя необходимо применение высоковольтных конденсаторов в схеме АФ. Это обусловлено тем, что для работы 4QS-преобразователя постоянное напряжение на конденсаторе должно превышать амплитудное значение сетевого напряжения. Как показывает практика, при напряжении сети 220 В для получения близкой к синусоиде формы потребляемого тока требуется постоянное напряжение на конденсаторе 300–350 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95) Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). – М.: Госстандарт России, 1999.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2000. – 638 с.
3. Патент на изобретение № 2187185, МПК H02J 3/18. Устройство для компенсации реактивной мощности / Кулинич Ю. М., Литовченко В. В., Савоськин А. Н. – № 2000104160/09; Заявлено 21.02.2000; Опубл. 10.08.2002. Бюл. № 22.
4. Патент на изобретение № 2383984, МПК H02J 3/18. Устройство для компенсации реактивной мощности / Кулинич Ю. М. – № 2009104536/09; Заявлено 10.02.2009; Опубл. 10.03.2010. Бюл. № 7.