УДК 621.398

Ю.А.СЫЧЁВ
Горно-электромеханический факультет,
группа ЭР-01-2, ассистент профессора

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ИСКАЖЕНИЯ КРИВЫХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Дана оценка влияния преобразовательной нагрузки на искажение кривых тока и напряжения.

Рассмотрены показатели качества электрической энергии, на которые высшие гармоники преобразователей оказывают наибольшее влияние, в том числе кривые тока для 6- и 12-пульсного преобразователей. Получены результаты их разложения в ряд Фурье.

Проведен анализ гармонического спектра этих кривых. Даны соотношения, отражающие зависимость порядка гармоник от пульсности преобразователя и позволяющие выбрать соответствующие фильтры для снижения отрицательного влияния гармоник преобразователей на режимы работы электрических сетей.

An estimation of converter load influence on the distortion of current and voltage curves is given in the paper.

Indicators of electrical power quality which are mostly influenced by high harmonics of converters were studied, including curves for 6-pulse and 12-pulse converters. Fourier series was calculated for these curves.

Harmonic spectrum of these curves was analyzed. The paper gives correlations reflecting the dependence of harmonics order on the converter pulse number and allowing selection of proper filters to decrease negative influence of the converter harmonics on the operation of power networks.

Силовые вентильные преобразователи играют существенную роль в современной электротехнике и энергетике. Однако они являются источниками высших гармоник, которые оказывают существенное влияние на форму кривой напряжения и тока и отрицательно влияют на режимы работы электроустановок, устройств технологической и сетевой автоматики [3]. Все это, в свою очередь, ведет к сокращению срока службы электрооборудования из-за перегрузки магнитных цепей, дополнительного нагрева, ускоренного старения изоляции. Именно вентильные преобразователи являются основной причиной ухудшения таких показателей качества электрической энергии, как коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U и коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$ [2].

Рассмотрим идеальный p-фазный двухполупериодный преобразователь (рис.1). Для большинства статических преобразователей характерно малое значение угла коммутации (порядка 5 электрических градусов), поэтому влияние его на формы кривых тока и напряжения незначительно и в дальнейшем не учитывается [1]. В этом случае форма кривой тока будет представлять собой периодические положительные и отрицательные прямоугольные импульсы длиной $w = 2\pi/p$, повторяющиеся с питающей

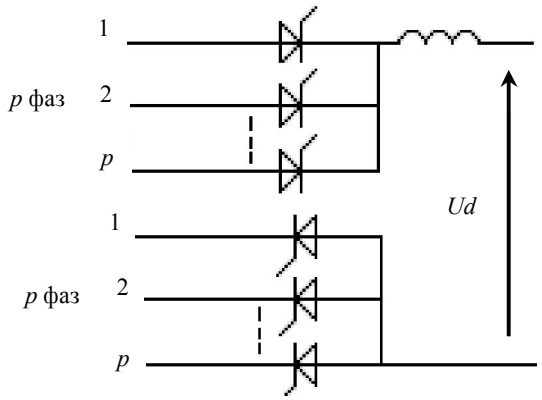


Рис.1. Двухполупериодный p-фазный преобразователь

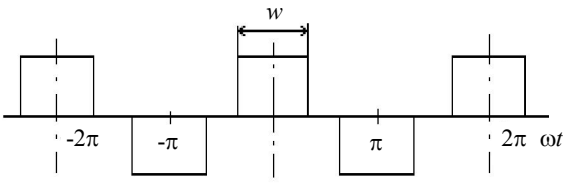


Рис.2. Последовательность положительных и отрицательных импульсов (угол коммутации равен нулю)

частотой (рис.2).

Если при анализе кривой на рис.2 за точку отсчета принять середину импульса, то функция будет четной и ряд Фурье для нее будет содержать лишь косинусные составляющие. Разложение данной кривой в этом случае будет иметь вид

$$A_K = \frac{2}{\pi}\left[\int_0^{\frac{w}{2}} I_m \cos kx\,\mathrm{d}\,x - \int_{\pi-\frac{w}{2}}^{\pi} I_m \cos kx\,\mathrm{d}\,x\right] = \frac{4I_m}{\pi k}\sin\frac{k\pi}{2}\cos k\frac{\pi - w}{2}; \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{4I_m}{\pi}\left[\sin\frac{w}{2}\cos\omega t + \frac{1}{3}\sin\frac{3w}{2}\cos 3\omega t + \frac{1}{5}\sin\frac{5w}{2}\cos 5\omega t + \ldots\right],$$

где I_m – действующее значение постоянного тока.

Анализ полученного разложения позволяет сделать следующие выводы: отсутствуют четные гармоники и постоянная составляющая; присутствуют только нечетные гармоники.

Разложение (1) можно также применить и для 6-пульсного преобразователя. Подставив в выражение (1) $w = 2\pi/3$, получим выражение для переменного фазного тока

$$i(t) = \frac{2\sqrt{3}I_m}{\pi}\left[\cos\omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t + \frac{1}{7}\cos 5\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \ldots\right]. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) позволяет сделать следующие выводы:

- отсутствуют четные гармоники и постоянная составляющая;
- отсутствуют нечетные гармоники порядка, кратного трем;
- присутствуют нечетные гармоники порядка $6k \pm 1$;
- гармоники порядка $6k + 1$ присутствуют в разложении с положительным знаком;
- гармоники порядка $6k - 1$ присутствуют в разложении с отрицательным знаком;
- среднеквадратичное значение тока основной частоты

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi}I_m = \frac{\sqrt{6}}{\pi}I_m;$$

- среднеквадратичное значение n-й гармоники $I_n = I_1/n$.

На фазный ток преобразователя оказывает влияние соединение обмоток преобразовательного трансформатора, когда либо первичная, либо вторичная обмотка соединена в треугольник. Разложение в ряд Фурье для этого случая может быть получено из выражения (1) соединением составляющих импульсов шириной π и π/3, при этом кривая будет иметь вид, представленный на рис.3. Разложение в ряд Фурье для этого случая будет выглядеть следующим образом:

$$i(t) = \frac{2\sqrt{3}I_m}{\pi}\left[\cos\omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 5\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t + \ldots\right]. \quad (2)$$

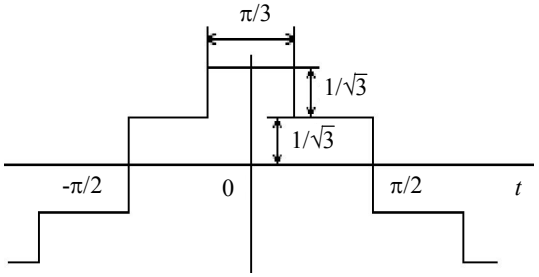


Рис.3. Представление 6-пульсной кривой при соединении обмоток трансформатора треугольник – звезда

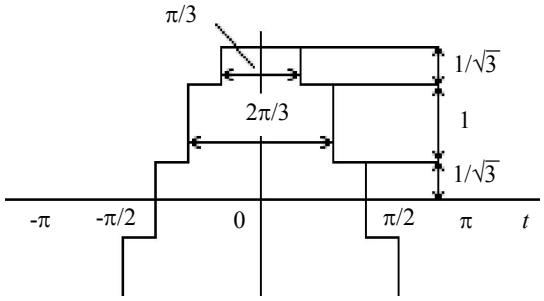


Рис.4. Представление 12-пульсной кривой во временн□й области

Выражение (3) отличается от выражения (2), полученного для соединения обмоток преобразовательного трансформатора звезда – звезда, лишь порядком чередования гармоник с номерами $6k \pm 1$ для нечетных значений k, т.е. 5, 7, 17, 19 и т.д.

Рассмотрим 12-пульсную систему: она состоит из двух 6-пульсных групп, получающих питание от двух трехфазных трансформаторов, фазы которых сдвинуты на 30°. Для получения 12-пульсного режима необходимо, чтобы обе 6-пульсные группы работали с одинаковым углом управления, при этом токи основной частоты со стороны системы переменного тока совпадают по фазе. Чтобы получить разложение в ряд Фурье кривой фазного тока для данного случая, нужно объединить ряды для трансформатора со схемой соединения звезда – звезда (2) и треугольник – звезда (3). Искомый ряд Фурье имеет вид

$$i(t) = \frac{4\sqrt{3}I_m}{\pi}\left[\cos\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{13}\cos 13\omega t - \frac{1}{23}\cos 23\omega t + \frac{1}{25}\cos 25\omega t - \ldots\right]. \quad (4)$$

Выражение (4) содержит только гармоники порядка $12k \pm 1$, токи гармоник порядка $6k \pm 1$ (для нечетных k: 5, 7, 17, 19 и т.д.) циркулируют между преобразовательными трансформаторами, но не проникают в сеть переменного тока (рис.4).

Многопульсные системы получают путем параллельного соединения питающих трансформаторов, например, 24-пульсная схема использует четыре трансформатора с фазами, сдвинутыми на 15°, а 48-пульсная – восемь трансформаторов с фазовыми сдвигами 7,5°.

Из (2) и (4) следует:

- порядок гармоник тока связан с пульсностью (m) преобразователя выражением $mk \pm 1$;
- амплитуды гармоник обратно пропорциональны их порядковому номеру;
- гармоники порядка $mk + 1$ при разложении имеют положительный знак;
- гармоники порядка $mk - 1$ при разложении имеют отрицательный знак.

Среднеквадратичное значение тока n-й гармоники находят из выражения

$$I_n = \frac{m}{\pi\sqrt{6}} I_m,$$

где I_m – действующее значение постоянного тока.

Теперь обратимся к гармоникам выпрямленного напряжения. Для трехфазной мостовой схемы гармоники напряжения имеют порядок mk. Исследования кривой выпрямленного напряжения позволяют получить общую формулу для гармоник напряжения в простейшем случае, когда углы коммутации и управления равны нулю:

$$U_n = \frac{\sqrt{2}U_m}{n^2 - 1}. \quad (5)$$

Зная гармонический состав выпрямленного напряжения, можно рассчитать упомянутые выше показатели качества электрической энергии.

Полученные уравнения позволяют правильно выбрать фильтры для уменьшения искажений кривых тока и напряжения в зависимости от схемы выпрямления и пульсности преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Горбачев Г.Н.* Промышленная электроника. М.: Энергоатомиздат, 1988.

2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / Госстандарт России. М., 1997.

3. *Федоров А.А.* Основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1979.

Научный руководитель д.т.н. проф. *Б.Н.Абрамович*