

©2012 г. С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков

ГБУЗ "Приазовский государственный технический университет", Мариуполь

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

Рассмотрена математическая модель параллельного активного фильтра с повышенным коэффициентом подавления высших гармоник. Повышение эффективности активного фильтра достигается за счет учета запаздывания в интерфейсном фильтре и подавления пульсаций на частоте переключения инвертора.

Ключевые слова: параллельный активный фильтр, интерфейсный фильтр, частота переключения инвертора.

Розглянута математична модель паралельного активного фільтра з підвищеним коефіцієнтом пригнічення вищих гармонік. Підвищення ефективності активного фільтра досягається за рахунок урахування запізнювання в інтерфейсному фільтрі і пригнічення пульсацій на частоті перемикання інвертора.

Ключові слова: паралельний активний фільтр, інтерфейсний фільтр, частота перемикання інвертора.

The article describes a mathematical model of shunt active power filter with improved suppression of higher-order harmonics. The efficiency of the active power filter is improved by using new reference generation algorithm, in which an interface filter's transfer function is taken into account.

Keywords: shunt active filter, interface filter, frequency switching.

Широкое распространение нагрузок, потребляющих несинусоидальный ток, приводит к снижению качества электроэнергии, в частности, к искажению формы кривой напряжения сети. Это, в свою очередь, ведет к негативным последствиям, таким как появление резонансных явлений в сети, вследствие чего возможно появление перенапряжений, увеличение потерь в электрических машинах и аппаратах, более интенсивное старение изоляции; ухудшение работы устройств релейной защиты, автоматики и телемеханики вследствие появления высокочастотных помех и др.

Обычно задачу устранения влияния на сеть нелинейных нагрузок решают с помощью установки фильтрокомпенсирующих устройств, в качестве которых могут выступать пассивные или активные фильтры. Применение пассивных фильтров в сетях 0,4 кВ, несмотря на свою простоту, имеет ряд недостатков. Более эффективным на сегодняшний день является применение активных фильтров, в частности, параллельных

АФ [1].

Основными проблемами при эксплуатации параллельных АФ на основе инверторов напряжения (ИН) являются ограниченная скорость изменения выходного тока, вызванная наличием интерфейсного фильтра (ИФ) и появление в выходном токе помех на частоте переключения ИН. В результате запаздывания в ИФ ограничивается частотный диапазон эффективной компенсации высших гармоник. Наличие помех с частотой переключения ИН в выходном токе АФ приводит к перемещению спектра гармоник в сторону высоких частот и может привести к возникновению резонансных явлений в сети [1], где также существуют гармоники с частотами выше 2 кГц [2].

Улучшить энергетические показатели АФ возможно за счет уменьшения частоты переключения инвертора, что приведет к снижению потерь в ключах. При этом ИФ должен удовлетворять противоречивым требованиям: с одной стороны, иметь плоскую АЧХ на частотах высших гармоник, с дру-

гой – эффективно подавлять помехи на частоте переключения инвертора АФ. Нами поставлена цель – разработать систему управления АФ, в которой формирование сигналов управления инвертором осуществляется с учетом передаточной функции ИФ.

Использование ИФ первого порядка (состоящего из одиночной индуктивности) зачастую не позволяет получить приемлемые показатели качества работы параллельного АФ. В большинстве применяемых в настоящее время параллельных АФ используются ИФ более высокого порядка, например, третьего.

Типовые схемы подключения интерфейсных фильтров первого и третьего порядков приведены на рис. 1.

Оптимальным, с точки зрения выполнения требований, предъявляемых к интерфейсному фильтру, является фильтр 3-го порядка (*LCL*-фильтр) [3, 4].

Нами предложен способ решения задачи повышения эффективности параллельного АФ, заключающийся в формировании сигналов управления ИН с учетом запаздывания в ИФ.

Определим передаточную функцию ИФ как отношение инжектируемого тока к выходному напряжению инвертора АФ, приняв допущение, что импеданс сети равен нулю:

$$H(s) = \frac{I_2(s)}{U_1(s)}. \quad (1)$$

Спектр тока i_2 , инжектируемого в точку подключения АФ, получим из спектра тока нагрузки, отфильтровав из него активную составляющую тока основной гармоники. После этого компоненты спектра напряжения на выходе инвертора АФ определяются как:

$$U_1(j\omega) = \frac{I_2(j\omega)}{H(j\omega)}. \quad (2)$$

Это позволяет учесть частотную характеристику ИФ. Опорное напряжение ШИМ сигналов управления инвертором формируем как обратное преобразование Фурье от $U_1(j\omega)$.

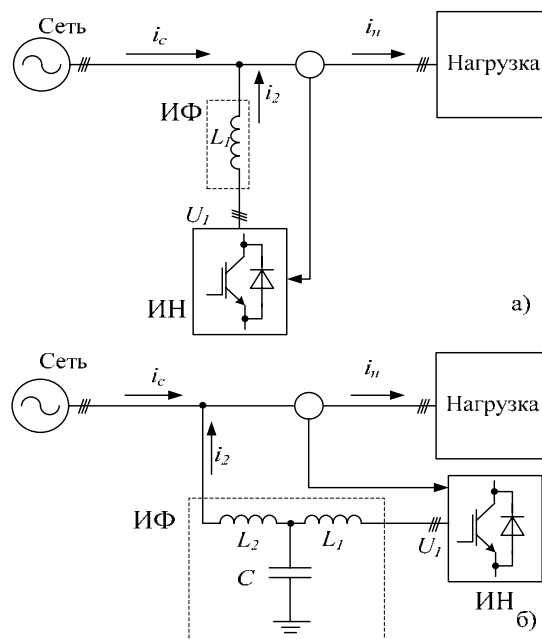


Рис. 1. Схема подключения параллельного АФ с ИФ: первого порядка (а), третьего порядка (б).

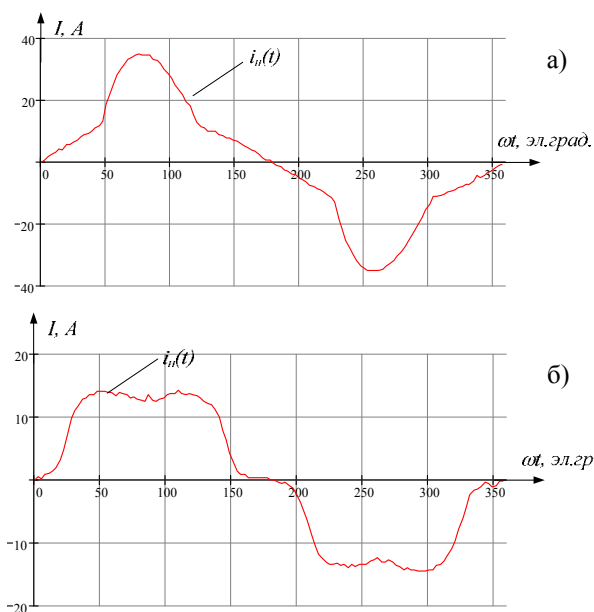


Рис. 2. Осциллограммы потребляемого тока сварочного источника ТДЭ-250 (а), ВДГ-302 (б).

Передаточная функция ИФ 3-го порядка (*LCL*-фильтр, рис. 1б) имеет вид:

$$H(s) = \frac{C \cdot s}{(1 + L_1 \cdot s^2 \cdot C) \cdot (1 + L_2 \cdot s^2 \cdot C) - 1}, \quad (3)$$

где L_1, L_2 – индуктивности ИФ [Гн]; C – емкость ИФ [Ф].

Для оценки эффективности системы управления АФ с учетом передаточной функции ИФ проведено математическое моделирование в среде *MathCAD*.

При моделировании в качестве образцов токов приемников взяты токи, потребляемые реальными сварочными источниками ТДЭ-250 и ВДГ-302, нагруженными на балластные реостаты (рис. 2). Осциллографирование производилось с помощью цифрового осциллографа АСК-2034 и токовых клещей SANWA CL-22AD.

Видно, что токи, потребляемые реальными сварочными источниками питания, носят несинусоидальный характер. Коэффициент нелинейных искажений (КНИ) первичного тока сварочного трансформатора ТДЭ-250 составляет 32,6%, КНИ потребляемого тока сварочного источника ВДГ-302 составляет 19,2%.

Согласно современным стандартам качества электроэнергии [5-7], КНИ тока нормируется до 40-й гармоники, поэтому при обработке реальных осциллограмм была произведена передискретизация (*downsampling*) до 128 точек на период, что определяет частотный диапазон АФ до 64-й гармоники.

В разрабатываемой нами системе управления АФ оцифровка тока нагрузки будет осуществляться 13-разрядным АЦП, тактовая частота для которого формируется петлей фазовой автоподстройки частоты и равна 128-кратной частоте сети. При этом для корректного учета АФЧХ ИФ частота сети предельно измеряется.

Такое техническое решение позволяет устранить влияние отклонений частоты сети на работу системы и использовать математический аппарат быстрых преобразований Фурье.

При моделировании работы АФ с ШИМ формированием выходного напряжения с учетом передаточной функции ИФ рассматривалось применение ИФ 3-го порядка.

Параметры модели АФ: несущая частота ШИМ 10 кГц, $L_1=10$ мГн, $L_2=100$ мкГн, $C=47$ мкФ [3], напряжение звена постоянно-го тока ± 400 В. Среднеквадратичное фазное напряжение сети 220 В, в спектре напряжения имеется только первая гармоника, полное сопротивление сети принято равным

нулю.

Логарифмическая амплитудно-частотная (ЛАЧХ) характеристика LCL-фильтра приведена на рис.3. Для эффективного подавления помех на частоте ШИМ последняя должна находиться выше резонансной частоты ИФ, которая определяется как:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 \cdot C}}, \quad (4)$$

где L_1, L_2 – индуктивности ИФ, C – емкость ИФ.

$$\omega_{\text{ШИМ}} = 10^4 \cdot 2\pi = 6,283 \cdot 10^4 \text{ рад/с},$$

$$\omega_{\text{рез}} = 1,466 \cdot 10^4 \text{ рад/с},$$

$$\omega_{\text{ШИМ}} > \omega_{\text{рез}}.$$

На рис.3 видно, что данное условие соблюдается.

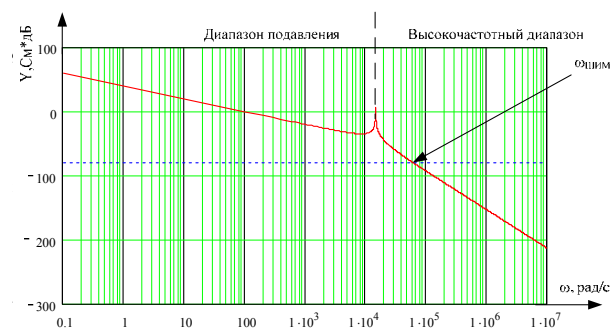


Рис. 3. ЛАЧХ LCL-фильтра.

На рис.4 приведены полученные кривые токов с учетом и без учета передаточной функции ИФ 3-го порядка.

На рис.5 видно, что без учета передаточной функции ИФ помимо повышения КНИ появляется сдвиг фаз между напряжением сети и током, полученный в результате моделирования, что требует дополнительной компенсации реактивной мощности.

Результаты моделирования показали, что учет передаточной функции ИФ приводит к снижению остаточного КНИ сетевого тока в 1,8–2,5 раза при применении ИФ 3-го порядка.

Выводы

1. Применение ИФ 3-го порядка позволяет снизить частоту переключения ключей инвертора, что, в свою очередь, улучшает энергетические характеристики параллельного активного фильтра.

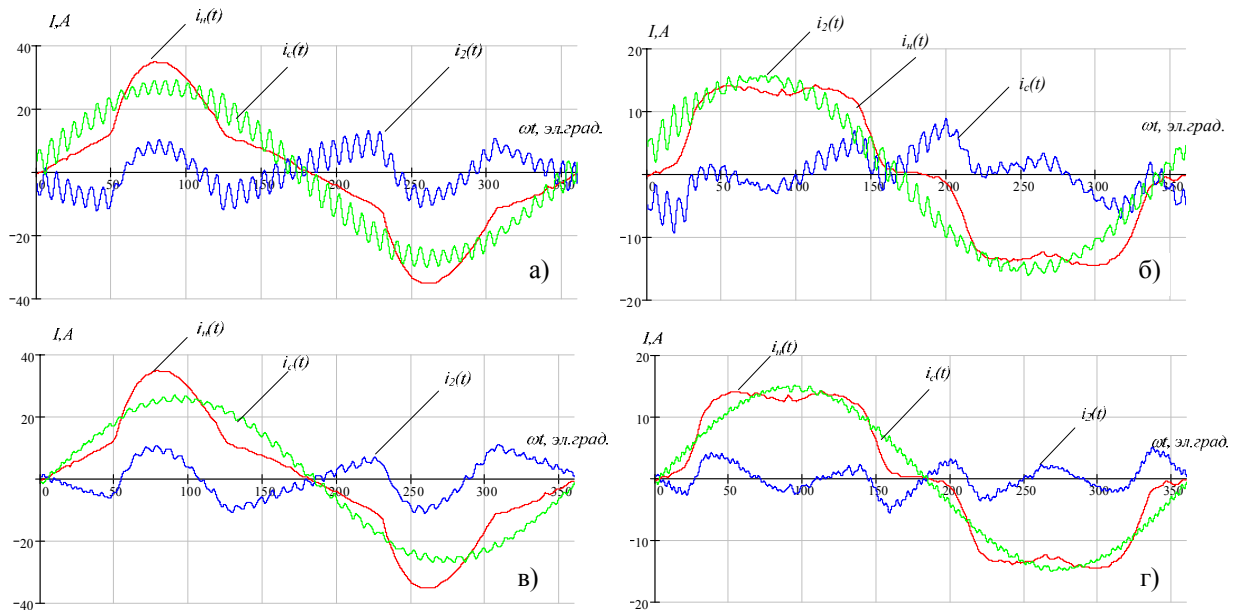


Рис.4. Кривые токов: без учета ПФ ИФ 3 порядка, источник ВГ-сварочный трансформатор ТДЭ-250, КНИ=2,576% (а), без учета ПФ ИФ 3 порядка, источник ВГ-сварочный источник питания ВДГ-302, КНИ=2,945% (б), с учетом ПФ ИФ 3 порядка, источник ВГ-сварочный трансформатор ТДЭ-250, КНИ=1,428% (в), с учетом ПФ ИФ 3 порядка, источник ВГ-сварочный источник питания ВДГ-302, КНИ=1,226% (г).

2. Учет передаточной функции ИФ позволяет формировать напряжение задания для ИН с учетом запаздывания ИФ, что позволяет повысить качество подавления высших гармоник тока нелинейных нагрузок в области частот до 2 кГц в несколько раз.

3. При оптимальном выборе параметров реактивных элементов ИФ в системе управления АФ может быть повышено качество подавления высших гармоник тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлака В.В., Гулаков С.В., Бублик С.К., Дьяченко М.Д. Параллельный активный фильтр с повышенным коэффициентом подавления высших гармоник тока // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2009. – Вип. 19 – С.237-241.
2. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А., Сапунов М.В. Доказано: в электросетях существуют высшие гармоники с частотами свыше 2 кГц // Новости электротехники. – 2005. – №2. – С.32.
3. Bitoleanu A., Popescu M., Marin D., Dobriceanu M. LCL interface filter design for shunt active power filters // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2010. – 10 (3). – P.55-60.
4. Zhiling Qiu, Kong Jie, Chen Guozhu A novel control approach for LCL-based shunt active power filter with high dynamic and steady-state performance // IEEE. – 2008. – P.3306-3310.
5. ГОСТ Р 51317.3.4-2006 (МЭК 61000-3-4:1998).
6. ГОСТ Р 51317.3.12-2006 (МЭК 61000-3-12:2004).
7. ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005).