

Ю.П. Гончаров, д-р техн. наук, В.В. Замаруев канд. техн. наук, В.В. Ивахно, Ю.В. Чурсина, Ю.П. Шульга

(Украина, Харьков, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт")

Н.В. Панасенко, д-р техн. наук, В.В. Божко канд. техн. наук

(Украина, Киев, Государственное предприятие "Государственный научно-исследовательский центр железнодорожного транспорта Украины")

В.Г. Сыченко, канд. техн. наук, В.А. Зубенко

(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В.А. Лазаряна)

СИСТЕМА АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОЙ ДОРОГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Анализ состояния проблемы и постановка задачи работы

Процесс разработки и внедрения новых мировых стандартов на качество потребляемой электроэнергии, который идет в настоящее время, вынуждает по-новому взглянуть на проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) преобразовательных агрегатов тяговых подстанций с питающей сетью промышленного переменного тока. Можно констатировать, что имеющееся в настоящее время электрооборудование тяговых подстанций не удовлетворяет новым требованиям, прежде всего, по двум основным показателям:

- гармоническому составу потребляемого из сети тока;
- соотношению между активной и реактивной компонентами потребляемой мощности.

Традиционным средством обеспечения ЭМС по указанным показателям является использование фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) на стороне переменного тока. Однако эти технические средства обладают большой установленной мощностью и решают только одну сторону проблемы ЭМС. По мнению авторов, более эффективными являются решения, которые одновременно решают также проблемы электромагнитной совместимости преобразовательного агрегата с контактной сетью (КС):

- по гармоническому составу напряжения в КС;
- по стабильности величины постоянной составляющей напряжения как основной гармоники выходного напряжения агрегата.

В данной работе предлагается соответствующая структура системы активной фильтрации (САФ), анализируются ее свойства и рассматриваются схемные решения некоторых узлов.

2. Структура САФ и ее общие свойства

Предлагаемая САФ использует сочетание следующих узлов (рис. 1):

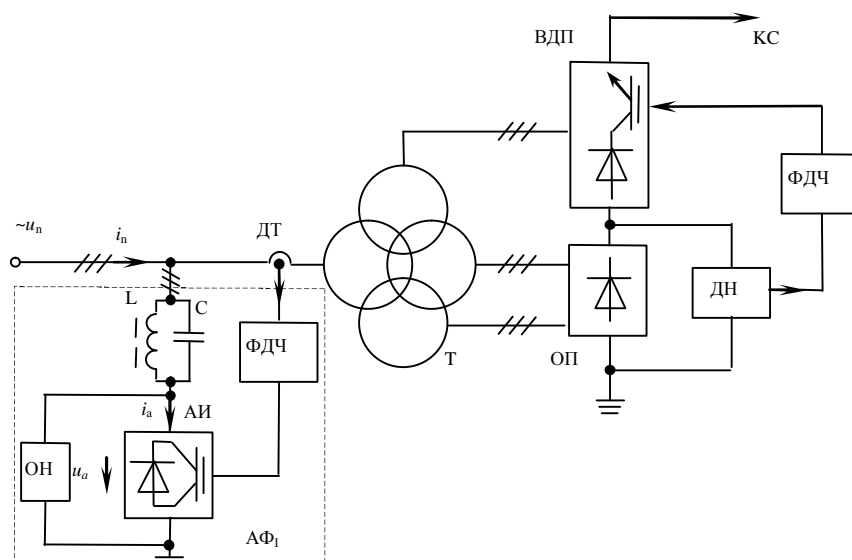


Рис. 1. Структурная схема системы активной фильтрации: u_n – питающая сеть; LC – индуктивно-емкостной балласт; AI – автономный инвертор; OH – ограничитель напряжения; T – силовой трансформатор; $OП$ – основной преобразователь; $ВДП$ – вольтодобавочный преобразователь; $\Phi_{вых}$ – выходной фильтр; $КС$ – контактная сеть; $ДН$ – датчик напряжения; $ДТ$ – датчик тока; $\PhiДЧ$ – фильтры дискретных частот

- основного преобразователя ($OП$) многопульсной структуры, работающего по традиционным схемам и с традиционными полупроводниковыми приборами при значениях угла управления в установившемся режиме, близких к 0^0 или 180^0 ; этот преобразователь обеспечивает основную долю (порядка 80%) от передаваемой активной мощности;

- вольтодобавочного преобразователя ($ВДП$) с широтно-импульсным способом управления, который на выходе стабилизирует напряжение и является последовательным активным фильтром, а на входе – компенсирует избыточную реактивную мощность и принимает на себя дополнительную долю (порядка 20%) от передаваемой активной мощности;

- параллельного активного фильтра ($AФ$) на входе, доводящего до требуемой кондиции гармонический состав потребляемого тока.

Последнее звено отличает систему от той структуры, которая предлагалась ранее, и позволяет придать системе активной фильтрации существенно более комплексный характер. Оно представляет собой трехфазный автономный инвертор с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией ($ШИМ$), который присоединяется к питающей сети через последовательный балласт на основе параллельного соединения дросселя и конденсатора. Балласт не пропускает к $AФ$ основную гармонику тока сети, что позволяет при 12-пульсном $OП$ получить установленную мощность собственно $AФ$ порядка 3% от передаваемой активной мощности. Относительная установленная мощность реактивных элементов балласта порядка 10%. Кроме того, $AФ$ содержит диодный ограничитель напряжения, нагруженный на емкостной накопитель энергии или варистор. Ограничитель действует в переходных и аварийных режимах работы.

Возможной альтернативой предлагаемому решению является полная замена элементной базы преобразовательного агрегата на новую, позволяющую решать все перечисленные задачи с помощью метода высокочастотной $ШИМ$ в основном энергетическом канале. Нет никакого сомнения в том, что этим альтернативным решением также целесообразно заниматься в расчете на внедрение в более отдаленной перспективе, когда новая элементная база станет доступной по цене.

3. Компенсация реактивной мощности вольтодобавочным преобразователем

Как уже говорилось ранее, задачу компенсации реактивной мощности в питающей сети решают обычно ФКУ на стороне переменного тока. В предлагаемой системе эта функция выполняется с меньшими затратами с помощью $ВДП$ рис. 2 [1-2], что позволяет исключить из ФКУ компенсирующую часть и оставить в нём только активный фильтр.

Определим насколько возрастет установленная мощность $ВДП$ при добавлении функции компенсации реактивной мощности.

Допустим вначале, что, кроме функции компенсации реактивной мощности, $ВДП$ исполняет только функцию регулирования выходного напряжения в относительных пределах:

$$\Delta u^* = u_{de} / u_d . \quad (1)$$

Тогда, согласно принятому алгоритму управления $ВДП$ [1-2] наибольшая достижимая амплитуда фазного тока i на входе $ВДП$ равна выходному току i_d

$$I_m = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = i_d = \sqrt{2} I , \quad (2)$$

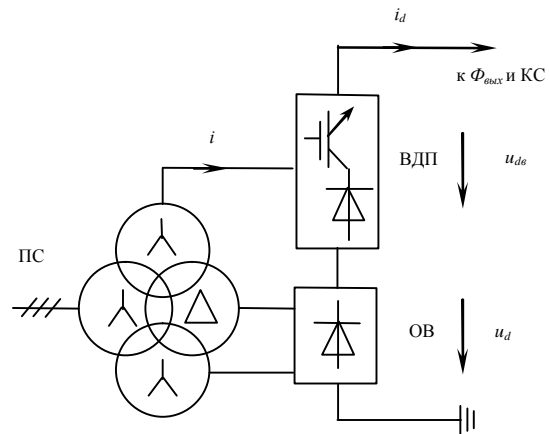


Рис. 2. Основной (ОП) и вольтодобавочный (ВДП) преобразователи

где I_a и I_p – действующие значения активного и реактивного тока на входе ВДП; I – полный действующий ток на входе ВДП
 Наибольшая активная мощность, создаваемая ВДП:

$$P_e = u_{de} i_d = \Delta u^* P_0 = 3UI_a \quad (3)$$

где P_0 – активная мощность основного выпрямителя; U – действующее значение фазного напряжения на входе ВДП.

Установленная мощность ВДП определяется полным действующим током:

$$S_e = 3UI = \sqrt{(3UI_a)^2 + (3UI_p)^2} = \sqrt{P_e^2 + Q^2} = \sqrt{(\Delta u^* P_0)^2 + P_0^2 (\frac{\sin \varphi_1}{\cos \varphi_1} \frac{\sin \varphi_2}{\cos \varphi_2})^2} \quad (4)$$

где φ_1 и φ_2 – углы сдвига между напряжением и током питающей сети при отсутствии и наличии ВДП.

Ввиду малости угла φ может быть принято приближенное равенство:

$$\operatorname{tg} \varphi \cong \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (5)$$

С учетом чего получим относительную установленную мощность ВДП:

$$S_e^* = \frac{S_e}{P_0} = \sqrt{\Delta u^{*2} + \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1} - \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} \right)^2} \quad (6)$$

При использовании параллельного АФ на входе в пределе исчезают высшие гармоники из потребляемого тока и тогда $\cos \varphi_2$ может быть принят равным рекомендованному значению 0,98 для коэффициента мощности. При отсутствии ВДП величина $\cos \varphi_1$ составляет около 0,95.

При этих данных на рис. 3 приведена зависимость установленной мощности ВДП от принятого в нем диапазона регулирования напряжения.

Кроме нее, приведена зависимость $S_e'^* = \Delta u^*$, которая получается в ВДП без дополнительной функции компенсации реактивной мощности.

Как видно, при введении дополнительной функции связанное с ней увеличение установленной мощности ВДП тем меньше, чем больше принятый в ВДП диапазон регулирования напряжения. Это же соотношение сохраняется и в том случае, если в ВДП диапазон регулирования Δu^* расширен для реализации других дополнительных функций, в частности функции активной фильтрации выходных гармоник.

В работе [2] было найдено, что при этом требуется иметь Δu^* порядка 0,2. Как следует из сопоставления зависимостей для S_e^* и $S_e'^*$ присоединение функции компенсации реактивной мощности ведет к увеличению установленной мощности ВДП примерно на 10%. Этот благоприятный фактор объясняется квадратичным суммированием реактивного тока с активным, что ведет лишь к незначительному увеличению длины результирующего вектора тока I в сравнении с активной составляющей I_a (рис. 4).

Для понимания сути процессов полезен также следующий дополнительный комментарий: чем больше Δu^* , тем более высокое напряжение U требуется иметь на входе ВДП и тем меньше, при заданной реактивной мощности Q , требуемый реактивный ток I_p на входе ВДП.

Возможной альтернативой применения ВДП является отдельный преобразователь на входе, действующий как генератор реактивной мощности, либо конденсаторная батарея там же с регулированием

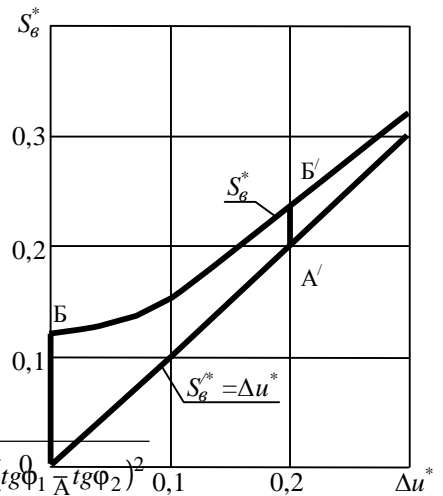


Рис. 3. Установленная мощность ВДП d-функции диапазона регулирования

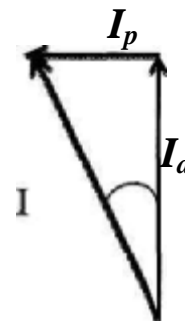


Рис. 4. К пояснению механизма снижения затрат на генерацию реактивной мощности

числа конденсаторов при изменении нагрузки подстанции. Однако относительная установленная мощность такого отдельного компенсирующего устройства пропорциональна длине отрезка АБ на рис. 3, в то время как добавочная установленная мощность ВДП, решающего ту же задачу, пропорциональна отрезку А'Б', т. е. примерно в 5 раз меньше.

4. Параллельный активный фильтр

Силовую схему АФ можно охарактеризовать системой трех относительных параметров:

$$b^* = \omega CR_N = \frac{R_N}{\omega L}; \quad u_0^* = \frac{u_0}{\sqrt{6}U_\phi}; \quad S_a^* = \frac{S_a}{P} \quad (7)$$

где b^* – относительная проводимость балласта; ω – частота первой гармоники сети; $R_N = U_\phi / I_N$ – номинальное (базисное) сопротивление; U_ϕ и I_N – действующие значения первой гармоники фазного напряжения и номинальной активной составляющей фазного тока сети; u_0^* – уровень ограничения напряжения в отношении к амплитуде линейного напряжения сети; $P = 3U_\phi I_N$ – номинальная активная мощность агрегата; S_a^* – относительная установленная мощность автономного инвертора.

Прокомментируем величины u_0^* и S_a^* . На рис. 5 показана целесообразная структура ограничителя напряжения. Его нагрузкой является источник противо-ЭДС u_0 , например, варистор или конденсатор достаточно большой емкости, напряжение на котором поддерживается маломощным обратимым преобразователем. Схема ограничивает амплитуду выходных линейных напряжений инвертора на уровне u_0 . Амплитуда $I_{ам}$ фазного тока инвертора ограничивается его средствами управления.

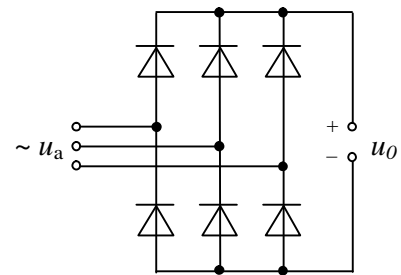


Рис. 5. Эквивалентная схема ограничителя напряжения

Для установленной мощности автономного инвертора получаем:

$$S_a^* = u_0^* I_{ам}^*, \quad I_{ам}^* = I_{ам} / (\sqrt{2} I_N). \quad (8)$$

В установившемся режиме ток i_a автономного инвертора равен с обратным знаком совокупности высших гармоник входного тока i_ϕ преобразовательного агрегата. Если пренебречь неканоническими гармониками этого тока, то частотный спектр удовлетворяет равенству:

$$k = 12q \pm 1, \quad q = 1, 2, 3... \quad (9)$$

На рис. 6 показан ток фазы автономного инвертора при пуске схемы.

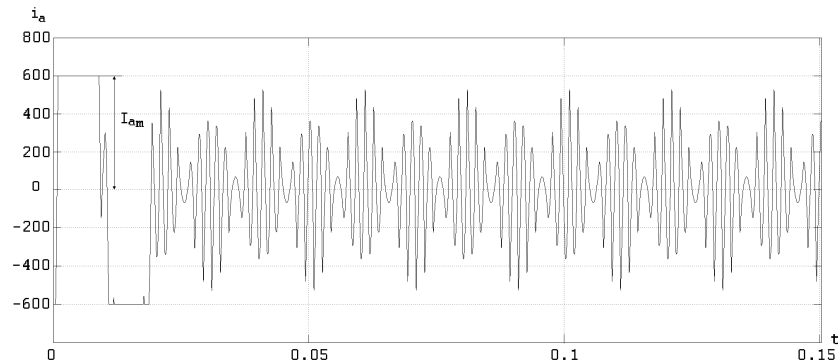


Рис. 6 Фазный ток автономного инвертора при пуске с нулевых начальных условий

В начале пуска происходит заряд емкостного балласта от источника u_n через ОН, поэтому ИН входит в режим токоограничения на один период питающей сети. В установившемся режиме величина $I_{ам}^*$ зависит от индуктивного сопротивления рассеяния силового транзистора x_s^* , снижаясь с его увеличением. В типовом диапазоне $0,08 \leq x_s^* \leq 0,12$ можно принять в качестве минимального значения (без запаса)

$I_{am}^* = 0,16$. Принимая, что эквивалентная относительная частота f_3^* тока инвертора по отношению к минимальной частоте гармоники ($\kappa = 11$) равна 1,4, компенсируем относительную амплитуду выходного напряжения инвертора как падение напряжения на конденсаторе балласта, и минимальный уровень ограничения напряжения:

$$U_{am}^* = \frac{I_{am}^*}{11f_3^*b^*} = u_0^* \quad (10)$$

Например, при $b^* = 0,1$ имеем $u_0^* = 0,104$ и $S_a^* = 1,7 \cdot 10^{-2}$, то есть установленная мощность *АИ* составляет всего 1,7% от мощности *ОП*. Но при этом реактивная мощность балласта, равная b^* , составляет 10% от мощности *ОП*. Как следует из (8) и (10), можно изменить эту пропорцию: при увеличении S_a^* пропорционально снижается b^* и наоборот.

В основу систем управления *АФИ* и *ВДП* целесообразно положить показанные на рис. 1 разомкнутые структуры. В *АФИ* для этого имеется датчик тока, выходной сигнал которого поступает на вход фильтра дискретных частот, который отделяет высшие гармоники тока i_a от основной гармоники, на которую *АИ* не должен оказывать влияние. Методика синтеза такого *ФДЧ* рассмотрена в [3]. Сигнал высших гармоник тока воспроизводится коммутатором *АИ*, работающим с высокочастотной *ШИМ*. При использовании автономного инвертора напряжения может быть применен, например, метод однопозиционного слежения за результирующим вектором тока трехфазной системы [4].

Канал управления *ВДП*, который действует на выходе как последовательный активный фильтр, строится по дуальным принципам.

5. Результаты моделирования

Система рис. 1 моделировалась в пакете "Matlab" при замещении коммутатора *АИ* непрерывным звеном, что соответствует неограниченно большой частоте *ШИМ*. Были приняты исходные данные примера, рассматривавшегося выше, при следующих базисных данных: $u_{a0} = 3300$ В, $P = 5 \cdot 10^6$ Вт. Коэффициент трансформации силового трансформатора *T* принимался равным единице. Шаг дискретизации импульсной характеристики *ФДЧ* составлял 1/96 от периода питающей сети. При экспериментах, которые комментируются ниже, изучались свойства параллельного *АФ_l* и проверялись соотношения методики выбора его параметров. Поэтому *ВДП* в схеме отсутствовал, а нагрузка *ОП* заменялась источником тока. Машинограмма рис. 4 получена на этой модификации модели.

На рис. 7, а–б показаны, соответственно, токи i_a и i_n . (рис. 1) при пуске с нулевых начальных условий.

Машинограмма i_b соответствует ступенчатому входному току 12-пульсного выпрямителя при $\alpha \cong 0$. На машинограмме i_n видно превращение этого тока практически в синусоидальный. Для этого требуется примерно 3 периода, т. е. рассматриваемая структура управления обеспечивает достаточно высокое быстродействие каналов подавления высших гармоник. При этом в ФДЧ выходной сигнал устанавливается за один период, а остальное время уходит на установление режима в реактивном балласте.

Малая постоянная времени последнего процесса обеспечивается за счет действия ОН, а также вспомогательного канала управления, на схеме рис. 1 не показанного и обеспечивающего режим эквивалентного активного сопротивления на выходе АИ.

На рис. 7, в показана машинограмма напряжения на выходе АИ. На ней также виден процесс установления режима, в результате которого первая гармоника из выходного напряжения АИ исчезает.

Моделирование подтвердило также количественные соотношения раздела 4 данной статьи.

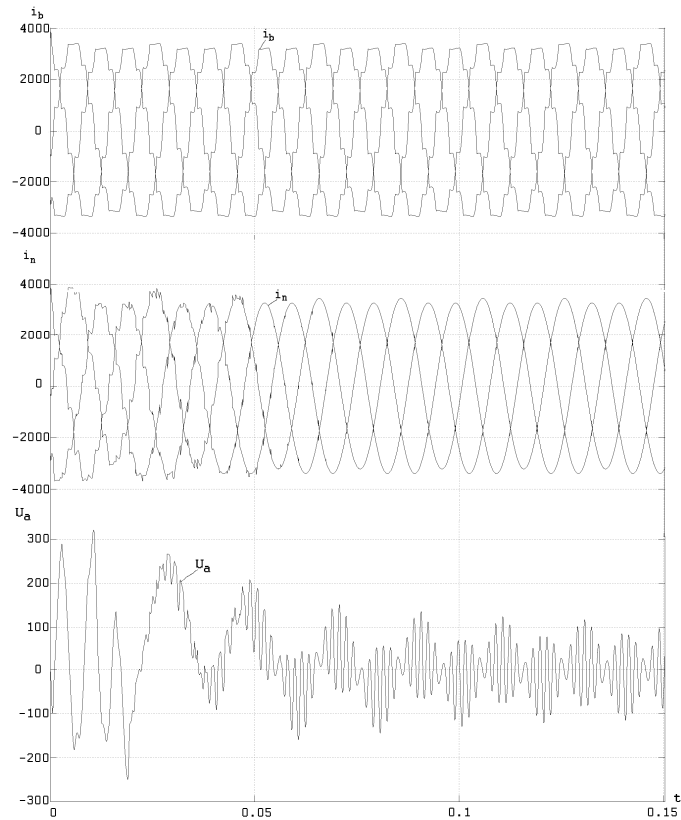


Рис. 7. Токи и напряжение при пуске с нулевых начальных условий

Выводы:

1. При рассматриваемом комбинированном подходе к построению системы активной фильтрации сокращается примерно в 5 раз затраты по установленной мощности звена, компенсирующего потребляемую из питающей сети реактивную мощность.
2. Система активной фильтрации преобразовательного агрегата основана на присоединении к многопульсному основному преобразователю вольтодобавочного ШИМ-преобразователя, работающего в качестве последовательного активного фильтра на выходе и компенсатора реактивной мощности на входе, а также параллельного активного фильтра при подавлении высших гармоник тока на входе.
3. Высокие коэффициенты подавления вредных гармоник и высокое быстродействие обоих активных фильтров достаточно при использовании структур управления с фильтрами дискретных частот, обеспечивающими прямоугольную частную характеристику на совокупности гармоник с частотами, кратными частоте питающей сети.

Список литературы

1. Гончаров, Ю. П. Перетворювач з вольтодобатком на повністю керованих напівпровідникових приладах для тягових підстанцій постійного струму [Текст] / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко / Електротехніка і Електроенергетика, 2007.– №2.– С. 4–11.
2. Гончаров, Ю. П. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог [Текст] / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. В. Божко. – Киев. : Залізничний транспорт України, 2007.– № 4. – С. 76–80.
3. Гончаров, Ю.П. Ограничение спектра периодических сигналов обратных связей в силовых активных фильтрах для систем электроснабжения контактных сетей [Текст] / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко В.Г. Сыченко / Науково-технічний збірник "Гірнична електромеханіка та автоматика", – Випуск 84, Дніпропетровськ 2010, с. 28 – 37.
4. Гончаров, Ю.П. Характеристики системы "инвертор напряжения-двигатель" при прогнозном управлении по результирующему вектору тока [Текст]/ Ю.П. Гончаров, М.В. Хворост, Н.Ю. Родін / Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність", ч.4 Київ, 2006, С. 45-50

Рекомендовано до друку: проф. Гетьманом Г.К.