

Активный выпрямитель с функцией коррекции коэффициента мощности для тяговой подстанции скоростной железной дороги

Евгений Сокол, д.т.н., член-корреспондент Национальной академии наук Украины,
ректор Национального технического университета «Харьковский политехнический
институт»

Виктор Сыченко, д.т.н., профессор ДНУЖТ им. ак. Лазаряна
Владимир Ивахно, к.т.н., профессор, НТУ «ХПИ» (Украина, Харьков),
Владимир Замаруев, к.т.н., профессор, НТУ «ХПИ» (Украина, Харьков)
Юрий Войтович, ассистент НТУ «ХПИ» (Украина, Харьков),
Богдан Стысло, к.т.н., ст. преподаватель, НТУ «ХПИ» (Украина, Харьков)

АННОТАЦИЯ – Целью работы является совершенствование подходов к обеспечению требуемых качественных параметров напряжения в тяговых сетях на основе современных технологий и оборудования. Пульсирующий режим энергопотребления в железнодорожной электросети является причиной возникновения пульсаций напряжения в контактной сети. Предложено использование активных выпрямителей в системе электропитания железной дороги. Разработана система управления преобразователем, который позволяет выполнить стабилизацию выходного напряжения в звене постоянного тока и обеспечивает единичный коэффициент мощности, потребляемой преобразователем и THD тока потребления на уровне 8%. Разработана математическая модель преобразователя и выполнено исследование его основных режимов работы.

Ключевые слова – AC/DC, качество электроэнергии, система тягового электроснабжения, режимы работы преобразователя, колебания мощности, THD

Введение и постановка задачи. Внедрение скоростного движения при использовании системы тягового электроснабжения постоянного тока обуславливает значительный рост нагрузки на систему внешнего питания, увеличение потребления реактивной мощности и уровней высших гармоник. Другим негативным фактором при увеличении тяговой нагрузки является значительное снижение напряжения токоприемников электровазов в тяговой сети и ухудшение энергетических характеристик потребления, таких как коэффициент мощности. Подключение к сети питания различных полупроводниковых преобразователей энергии и нелинейных нагрузок приводит к снижению коэффициента мощности. Вызываемые такими устройствами искажения потребляемого тока отрицательно влияют на другое электрооборудование, что вызывает проблемы их электромагнитной совместимости (ЭМС). Международные стандарты по электромагнитной совместимости представлены публикациями IEEE 519 [1], IEC61000 [2] и др. Они, как правило, определяют гармонический состав потребляемого тока до 50-й гармоники. Современная элементная база с использованием принципов импульсной модуляции позволяет обеспечить близкий к единице коэффициент мощности преобразователей электроэнергии. В большинстве практических случаев значение коэффициента мощности достигает 0,99 и является достаточным для того, чтобы считать влияние потребителя на питающую сеть несущественным.

Радикальное снижение массы магнитных элементов преобразователя достигается в полупроводниковых корректорах коэффициента мощности. Для всех корректоров

коэффициента мощности, использующих технологию повышающего ШИМ, характерен единичный коэффициент мощности и низкий коэффициент гармоник потребляемого тока в низкочастотной области (до 50-й гармоники частоты питающей сети) за счет сдвига генерируемых гармоник тока в высокочастотную область.

Целью данной работы является разработка и исследование режимов работы активного выпрямителя для систем электроснабжения постоянного тока железнодорожного транспорта.

Структура и принцип работы трехфазного активного выпрямителя. Трехфазный активный выпрямитель (ТАВ) представлен на рис. 1. Данный преобразователь работает в режиме повышающего трехфазного широтно-импульсного преобразователя с коррекцией коэффициента мощности [3].

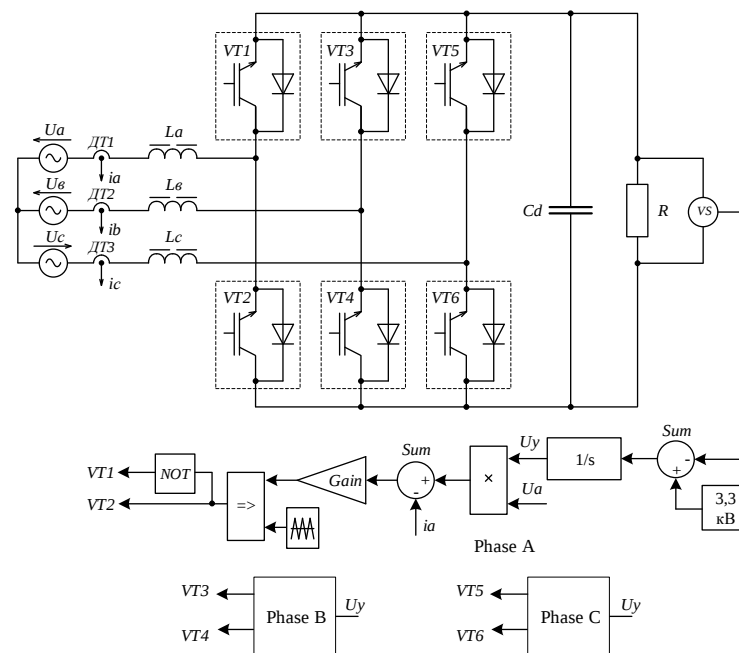


Рис. 1 Схема полноточного трехфазного активного выпрямителя

Силовая часть преобразователя (рис.1) состоит из входного фильтра (L_a - L_b - L_c), силового коммутатора с ключами знакопеременного тока $VT1$ - $VT6$, выходного фильтра C_d .

Принцип работы схемы основан на дозированном отборе энергии из питающей сети и последующей передачей этой «порции» энергии в нагрузку. При этом потребляемый из сети ток имеет форму синусоиды с наложенной на неё высокочастотной составляющей, причём эта синусоида не имеет сдвига фазы относительно напряжения питающей сети.

Даная система управления имеет двухконтурную систему регулирования. Интегральный регулятор первого контура обеспечивает стабилизацию выходного напряжения. Второй контур выполнен на основе пропорционального регулятора и формирует синусоидальный сигнал задания входного тока, совпадающего по фазе с

входным напряжением. Поскольку по своей топологии преобразователь является повышающим, необходимым условием его работы является соблюдение отношения $U_{вх} < U_n$. Соблюдение указанных принципов построения САР позволяет достичь близкого к единице коэффициента мощности и обеспечить потребление из сети синусоидального тока. Индуктивность входных фильтровых дросселей зависит от частоты модуляции, а также параметров входных и выходных величин. Возможность работы активного выпрямителя в инверторном режиме позволяет использовать в звене постоянного тока (в месте подключения фильтрового конденсатора C_d), энергоемких накопителей электрической энергии, включенных через дополнительный согласующий DC/DC преобразователь [4]. Такое решение позволяет улучшить энергетические характеристики системы, повысить ее устойчивость в условиях нестационарности нагрузки, а также выполнить временную утилизацию энергии рекуперации с последующим ее возвратом.

Основные преимущества использования активного выпрямителя в составе системы электроснабжения железнодорожного транспорта: возможность двунаправленной передачи энергии; обеспечение фазных токов сети, близких по форме к синусоидальной; поддержание высокого коэффициента мощности; стабилизация уровня выходного напряжения.

Система управления активным выпрямителем с использованием ШИМ.

Целью системы управления является минимизация отличия формы потребляемого из сети тока от синусоидальной а также стабилизации выходного напряжения. Обобщенная структура системы управления активным выпрямителем представлена на рис. 2

Обеспечение синусоидальной формы потребляемых из сети токов обеспечивается сигналом I_{ref} , который вычисляется путем математического перемножения выходной

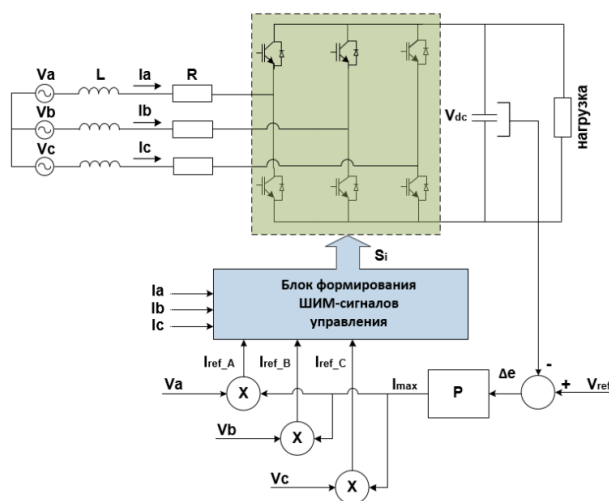


Рис. 2. – Система управления активным выпрямителем

величины регулятора I_{max} на величину единичного сигнала синусоидальной формы, совпадающего по фазе с частотой напряжения питающей сети в каждой из фаз. С целью устранения фазового сдвига между потребляемыми токами и напряжениями в каждой из фаз, производится синхронизация опорного единичного синусоидального сигнала с моментом перехода кривой напряжения через ноль. При этом, для функционирования цифровой системы

управления достаточно синхронизации лишь с одной фазой, два остальных опорных сигнала могут быть получены путем сдвига на 120 и 240 эл. град., соответственно.

Полученные сигналы задания потребляемых из сети токов (I_{ref_A} , I_{ref_B} , I_{ref_C}) передается в блок формирования ШИМ - сигналов управления силовыми IGBT – транзисторами. Широтно – импульсная модуляция обеспечивает алгоритм коммутации силовых ключей активного выпрямителя с целью формирования синусоидальной кривой потребляемого из сети тока.

Моделирование режимов работы активного выпрямителя. Выходными данными для построения Matlab-модели и расчета основных энергетических характеристик активного выпрямителя приняты: номинальная выходная мощность, 5200 кВт; номинальный выходной ток I_n 1600 А; выходное выпрямленное напряжение $0 \div 3300$ В; индуктивность тяговой сети 0,8-0,85 мГн/км; емкость тяговой сети 0,014 мкФ/км; коэффициент пульсации напряжения 20 %; THD потребляемого тока 8%; частота ШИМ 1000 Гц. В качестве силовых ключей могут быть использованы IGBT модули CM900NB-90N Mitsubishi Electric Corporation [5]. IGBT модуль имеет 1,5-кратный запас по напряжению, но не удовлетворяет требованиям по току. Для удовлетворения требованиям по току необходимо использовать параллельное соединения модулей. Для 1,5-кратного запаса по току необходимо выполнить параллельное соединение трех модулей. Таким образом, общее количество используемых ключей - 18. Оценка статических и динамических потерь в силовых ключах преобразователя при частоте ШИМ 1000 Гц составляет порядка 0,98%. Имитационная Matlab-модель активного трехфазного выпрямителя представлена на рис. 3.

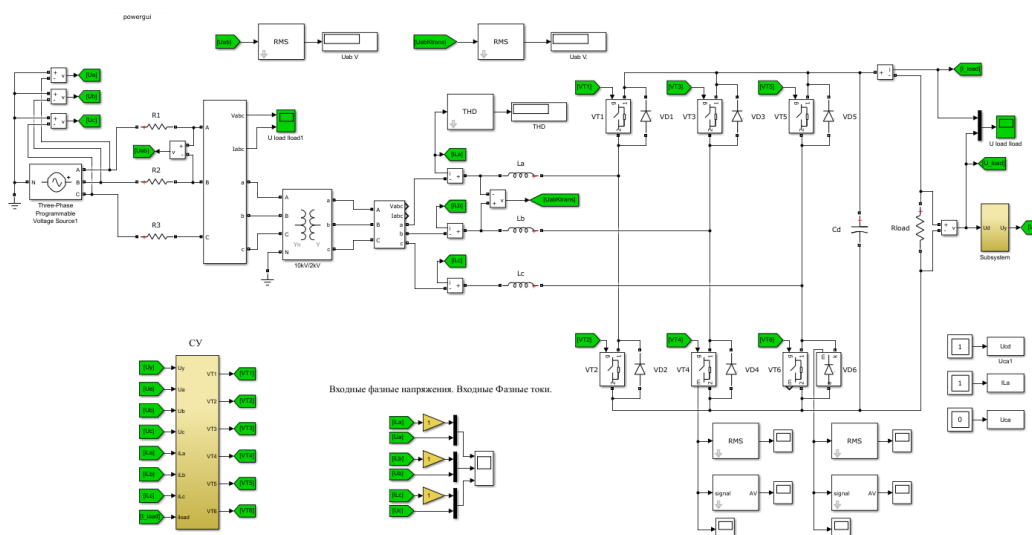


Рис. 3 Имитационная модель активного выпрямителя с треугольным методом формирования ШИМ в среде MatlabSimulink

Поскольку нагрузкой для разработанной схемы активного выпрямителя является подвижной состав, целесообразно выполнить исследование работы преобразователя при характерных для такого типа нагрузки режимах. В условиях стационарной нагрузки и изменения уровня питающего напряжения в диапазоне $\pm 20\%$ система управления преобразователя обеспечивает стабилизацию выходного напряжения контактной сети (рис. 4, а). В модели также был исследован режим кратковременного (длительностью менее одного периода сети) отрыва пантографа (рис. 4, б).

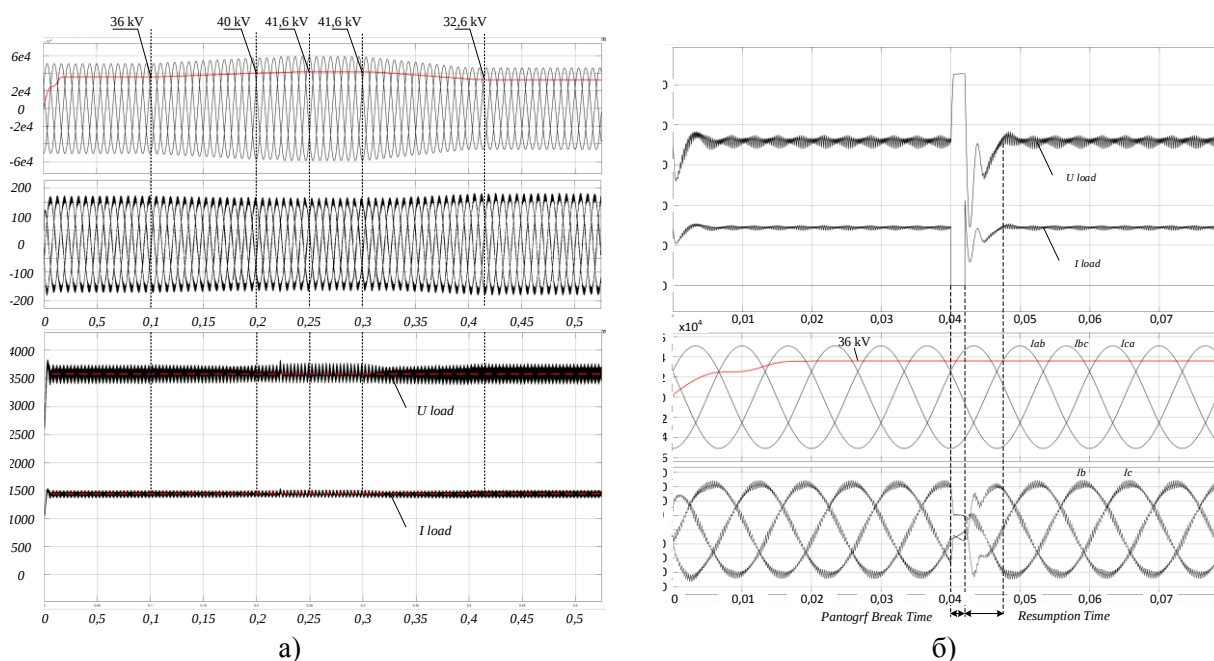


Рисунок 4. Осциллограммы выходного тока и напряжения контактной сети при изменении уровня входного напряжения питающей сети (а); гармонический состав потребляемого тока в установившемся номинальном режиме (б)

При уменьшении уровня входного напряжения наблюдается повышение ТНД за счет повышения потребляемого тока. Таким образом, расчет параметров входных дросселей необходимо осуществлять для наихудшего режима работы – повышенное входное напряжение. Продолжительность переходного процесса выхода в установившийся режим при штатном отрыве пантографа занимает около 0,5 периода сети. ТНД данного преобразователя составляет 8%.

Выводы. Использование активных выпрямителей в системах электроснабжения железнодорожного транспорта позволяет обеспечить стабилизацию выходного выпрямленного напряжения на необходимом уровне и близость коэффициента мощности преобразователя к единице. При этом из сети потребляются токи, близкие по форме к синусоидальной. Немаловажным достоинством данного преобразователя является двусторонняя передача электроэнергии, что позволяет рекуперировать электроэнергию в момент торможения подвижного состава.

В среде Matlab Simulink при использовании пакета Power Electronics была разработана математическая модель активного выпрямителя питающего подвижной состав мощностью 5 МВт, при напряжении питания 3,3 кВ. При помощи созданной математической модели были исследованы основные режимы работы преобразователя. Гармонический состав потребляемого тока в установившемся номинальном режиме соответствует действующим стандартам.

1. IEEE Std 519TM-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems" (*Revision of IEEE Std 519-1992*) p. 29, 2014.

2. IEC 61000. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-1: Generic standards – Immunity for residential, commercial and light-industrial environments. Second edition 2005-03.

3. Analysis and Comparison of Different Active Rectifier Topologies for Avionic Specifications. Universidad Politécnica de Madrid Centro de Electrónica Industrial Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial. Septiembre, 2014.

4. Sokol, E., Zamaruev, V., Kryvosheev, S., Styslo, B., & Makarov, V. (2017). The specificity of electrical energy storage unit application. Paper presented at the 2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2017 - Proceedings, 432-435.

5. <https://www.mouser.com/datasheet/2/328/1SD312F2-CM900HB-90H-612651.pdf>

Active rectifier for high-speed rail traction substation with power factor correction

Evgen Sokol, Doctor of Technical Sciences, the National Academy of Sciences of Ukraine
Corresponding Member, Rector of NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv)

Viktor Sychenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, DNUZT ak. Lazaryana (Ukraine, Dnipro)

Volodymyr Ivakhno, Ph.D., Professor, NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv)

Volodymyr Zamaruev, Ph.D., Professor, NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv)

Yurii Voitovych, assistant, NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv)

Bohdan Styslo, Ph.D., Art. Lecturer, NTU "KhPI" (Ukraine, Kharkiv)

ABSTRACT - The aim of the work is to improve approaches to providing the required quality voltage parameters in traction networks based on modern technologies and equipment. The pulsating power consumption in the railway network is the cause of voltage ripples in the contact network. The use of active rectifiers in the railway power supply system is proposed. A converter control system has been developed that allows stabilization of the output voltage in the DC link and provides a unit power factor consumed by the converter and THD of the current consumption at the level of 8%. A mathematical model of the converter is developed and a study of its main operating modes is performed.

Keywords - AC / DC, power quality, traction power supply system, converter operating modes, power fluctuations, THD