

Современное тяговое оборудование для многосистемных электропоездов

BORDLINE-Compact-Converter — это первый тяговый преобразователь с интегрированным блоком питания вспомогательных устройств. Преобразователь, построенный на полупроводниковых вентилях низкого напряжения, может использоваться как на дизель-поездах с электрической передачей, так и на электропоездах, получающих питание от сети однофазного переменного тока напряжением 15 и 25 кВ. Дополнительный инвертор на первичной стороне, подключенный к отдельной обмотке трансформатора, позволяет использовать поезда, оборудованные такими преобразователями, на участках, электрифицированных по системе постоянного тока напряжением 3 кВ.

В 2002 г. компания АВВ выступила как первый разработчик и изготовитель тяговых преобразователей, построенных на базе низковольтных полупроводниковых вентилях и используемых на магистральном тяговом подвижном составе переменного тока. Разработанный преобразователь типа СС750 стал первым представителем семейства BORDLINE-Compact-Converter. Решение о выборе этой концепции продиктовано несколькими причинами. Во-первых, в области низковольтных полупрово-

дниковых приборов появились интересные разработки, во-вторых, это дает возможность использовать промежуточное звено тягового преобразователя с низким напряжением, которое может питать цепи вспомогательных устройств.

Эта компактная система с водяным охлаждением (рис. 1) предназначена для установки на поездах региональных сообщений, могущих пересекать границы соседних стран. В связи с этим она была разработана до многосистемной. Поезда с новым преобразователем

могут эксплуатироваться на линиях переменного тока напряжением 15 и 25 кВ, частотой соответственно 16,7 и 50 Гц, а также постоянного тока напряжением 1,5 и 3 кВ.

Разработка тягового преобразователя с интегрированной системой питания вспомогательных устройств

Использование низкого напряжения

Преобразователь СС750 изготовлен из серийно выпускаемых промышленностью компонентов, к которым относятся также и низковольтные полупроводниковые приборы. Благодаря этому достигается значительное уменьшение массы и объема тягового оборудования и повышение удобства в эксплуатации. Для пассажиров важным преимуществом новых преобразователей является отсутствие шума при их работе.

Высокая удельная мощность конденсаторов, используемых в данном диапазоне напряжений, позволяет отказаться от обычной поглощающей цепочки и гасить вторую гармонику за счет увеличения емкости конденсаторов промежуточного звена. Эта концепция позволяет переходить с частоты 16,7 на частоту 50 Гц без дополнительных переключений в цепях фильтра поглощающей цепочки. Однако в этом случае необходимо переключение соответствующего программного обеспечения, которое должно происходить автоматически сразу же после распознавания специальной схемой изменения системы тягового тока.

Регулирование преобразователя осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции синусоидальной кривой; выходное напряжение имеет фиксированную частоту 2 кГц. Возможность подачи тактовых импульсов без переключения импульсных алгорит-



Рис. 1. Общий вид преобразователя СС750, устанавливаемого на моторвагонных поездах

мов управления позволяет реализовать плавное трогание и разгон во всем диапазоне скорости. Преимущество этого метода заключаются не только в достигаемой высокой плавности хода, но также в значительном упрощении процесса регулирования и снижении пульсаций крутящего момента. Реализация метода достигается в большой степени благодаря использованию высокоэффективных низковольтных полупроводниковых приборов, которые, несмотря на относительно высокую частоту переключений, обеспечивают низкие потери.

Работа тяговых двигателей на пониженном напряжении при сохранении во всем диапазоне частоты вращения синусоидальной формы кривой тока способствует снижению в них потерь в связи с уменьшением величины токов высших гармоник и в большой степени понижает уровень требований к изоляции. Регулирование магнитного потока двигателей также происходит плавно, при этом не возникают зоны нестабильности, характерные для методов регулирования с переключением импульсных алгоритмов управления.

Необычно высокая для тяги тактовая частота, равная 2 кГц, которая может быть даже еще повышена с некоторыми ограничениями, позволяет решать ряд задач, выполнение которых до сих пор было не реальным. Здесь следует упомянуть измерения, проводившиеся на новом статическом преобразователе подстанции Вимис в Швейцарии с целью проверки его совместимости с сетью. Для этого на электропоезде семейства FLIRT был установлен тяговый преобразователь BORDLINE-Compact-Converter типа CC750, который с помощью специально разработанного программного обеспечения можно было переводить в режим генератора сигналов, позволяющего определять импеданс сети. Предварительно этот технологический прием был использован для метрологической оценки модели исследуемой сети.

Интегрирование системы питания вспомогательных устройств

Преимущества низковольтных систем не ограничиваются рассмотренными примерами. Напряжения промежуточного звена тягового преобразователя, равное 750 В постоянного тока, позволяет подключать непосредственно к нему преобразователь, питающий вспомогательные устройства трехфазного тока, и преобразователь постоянного/постоянного тока для зарядки аккумуляторов. При этом система питания вспомогательных устройств полностью, т. е. механически и электрически (в том числе по цепям управления и регулирования), интегрируется в тяговый преобразователь.

Благодаря использованию этого принципа интеграции бортового электроснабжения вспомогательные устройства могут получать питание как от контактного провода через трансформатор и сетевой регулятор, так и с использованием преобразованной кинетической энергии, накапливаемой в промежуточном звене тягового преобразователя. Таким образом, электроснабжение вспомогательных устройств возможно также при прохождении поезда под нейтральными вставками или при кратковременном исчезновении напряжения контактной сети.

Пониженное напряжение системы питания вспомогательных приводов и вторичной обмотки главного трансформатора позволяет реализовать режим работы бортового электроснабжения без использования сетевого регулятора. Для этого силовые диоды, которые в схеме фазных модулей соединены встречно-параллельно с биполярными транзисторами с изолированным затвором (IGBT), включаются по схеме нерегулируемого мостового выпрямителя. Система регулирования преобразователя, питающего вспомогательные устройства, понижает выпрямлен-

ное напряжение и преобразует его таким образом, что на выходе образуется трехфазная система 3 × 400 В. Этот режим работы, обеспечивающий значительное снижение потерь, используется в тех случаях, когда поезд находится в депо или в отстое.

Аппаратные и программные средства управления

Концепция механической и электрической интеграции тягового и вспомогательного преобразователей обнаруживает свои преимущества также и в отношении аппаратных и программных средств управления. Общая система управления и интегрированное программное обеспечение способствуют повышению надежности за счет снижения числа блоков управления, а также благодаря полной интеграции программного обеспечения для систем тягового привода и питания вспомогательных устройств.

Выпускаемый многими компаниями высокопроизводительный компьютер типа AC 800PEC (рис. 2) представляет собой так называемую платформу управления (Control-Plattform), которая характеризуется следующим:

- наличием высокопроизводительного процессора и вентильной матрицы FPGA для решения задач, требующих высокой скорости, таких, как генерирование импульсов, модуляция, реализация функций защиты полупроводниковых приборов, программируемых на языке VHDL;
- возможностью моделирования и программирования с использованием программы MATLAB/Simulink и инструментария американской



Рис. 2. Компьютер AC 800PEC, выпускаемый компанией ABB

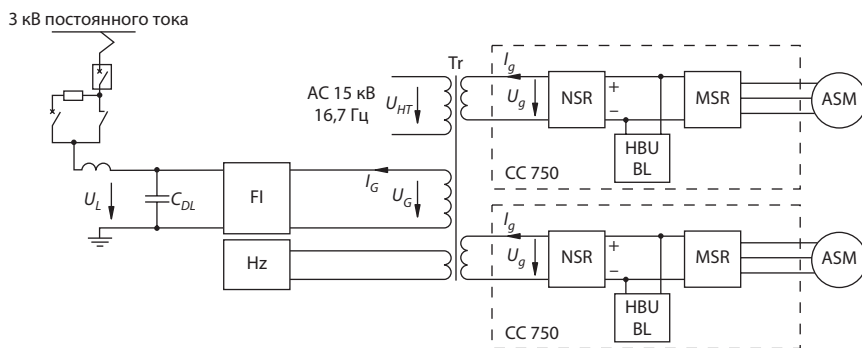


Рис. 3. Общая схема тягового преобразователя с входным инвертором;

U_L, C_{DL} — элементы входного фильтра; FI — входной инвертор; Hz — система электрического отопления; U_{HT} — напряжение контактной сети переменного тока; Tr — трансформатор; U_G — напряжение прямоугольной формы на выходе входного инвертора; NSR — сетевой регулятор; HBU BL — преобразователь питания вспомогательных устройств и зарядный агрегат; MSR — импульсный инвертор, питающий трехфазные тяговые двигатели ASM; I_g, U_g — соответственно ток и напряжение на входе сетевого регулятора

фирмы MathWorks, ориентированного на работу в реальном времени;

- наличием рабочей системы реального времени VXWorks американской компании Wind River Systems;
- возможностью загрузки программ через стандартные сетевые интерфейсы.

Доработка преобразователя до многосистемного варианта

Реализация Федеральными железными дорогами Швейцарии (SBB) проекта регионального электропоезда TILO (Ticino Lombardia), предназначенного для международного сообщения между Швейцарией и Италией, потребовала дополнить его тяговый преобразователь компонентами, которые сделали бы возможной эксплуатацию поезда на итальянских линиях постоянного тока напряжением 3 кВ. При разработке дополняющих компонентов преобразователя, рассчитанного на напряжение 15 кВ переменного тока частотой 16,7 Гц, нужно было решить основную задачу: сохранить не только концепцию преобразователя, построенного на низковольтных полупроводниковых приборах, но также и все оборудование, включая тяговые дви-

гатели, кабельную разводку, защиты и т. д.

Совместная работа компании ABB Schweiz с изготовителем подвижного состава StadlerRail и компанией, специализирующейся на выпуске трансформаторов, позволила создать новую концепцию преобразователя на базе входного инвертора для напряжения 3 кВ постоянного тока. Включение со стороны входа дополнительного звена для преобразования постоянного тока в переменный низкой частоты позволяет сохранить всю схему, подключенную со вторичной стороны трансформатора.

Применение современных инструментов моделирования делает возможным проведение в короткое время исследований и реализацию этой простой и эффективной системы, ориентированной на современные приборы силовой электротехники, а также успешное внедрение ее на подвижном составе.

От идеи к реализации

Еще в начале работы над проектом все его участники руководствовались стремлением сохранить и расширить использование основных преимуществ низковольтной преобразовательной техники. Здесь сразу же встал вопрос о том, как с наименьшими затратами адаптировать существующий электропоезд

к эксплуатации под контактной сетью постоянного тока.

Как известно, современный уровень техники в области создания многосистемного подвижного состава ориентирован на применение преобразователей среднего уровня напряжения, которые с помощью соответствующих схемных перегруппировок оборудования могут быть переключены с переменного тока на постоянный и наоборот. Общим для всех этих концепций является то, что промежуточное звено преобразователей имеет напряжение 2,8 кВ постоянного тока и более. При этом напряжение постоянного тока, получаемое из контактной сети, может непосредственно подаваться в схему промежуточного звена или же преобразовываться с помощью понижающего регулятора.

Несмотря на то что компания ABB имеет разработки в области технологий среднего уровня напряжений, а именно при создании мощных стационарных статических преобразователей мощностью, измеряемой в мегаваттах, или тяговых преобразователей с трехточечной схемой, тем не менее идея перевода всего тягового тракта преобразователей на систему среднего уровня напряжения вскоре была отвергнута. Это привело к тому, что для всего тягового тракта, включая трансформатор, тяговые двигатели, вспомогательный преобразователь и кабельную разводку, пришлось разрабатывать новую концепцию.

Недостатки многосистемных преобразователей среднего уровня напряжения, связанные со сложностями организации технического обслуживания компаниями, выполняющими перевозки, и обусловленными этим слишком высокими затратами, стали основной причиной освоения тяговой системы с входным низкочастотным инвертором (рис. 3). Эта концепция впервые была реализована еще в 1966 г. на электровозе серии 184, однако она не имела успеха из-за слишком низкой электрической прочности вы-

пускавшихся в то время тиристоров. Тем не менее компания ABB все же вернулась к этому решению и построила схему на базе технологии биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT).

В большой степени успех проекта был обеспечен современными возможностями моделирования процессов и наличием управляющей платформы AC 800PEC, исполненной в виде отдельного блока и предназначенной для управления работой приборов силовой электроники. После проведения большого объема работ по моделированию процессов и выполнения лабораторных исследований за короткое время был изготовлен опытный образец преобразователя и успешно проведены его первые эксплуатационные испытания.

Передача мощности на основной частоте

Входной инвертор на напряжении 3 кВ выполнен по трехточечной схеме как однофазный мост с рабочей частотой менее 100 Гц. Фазные модули этого инвертора построены на транзисторах IGBT с обратным напряжением 3,3 кВ. Входной фильтр препятствует дальнейшему распространению высших гармоник, поступающих из контактной сети постоянного тока.

Рабочая частота в зависимости от результата оценки уровней гармоник может быть выбрана в диапазоне от 60 до 100 Гц. Частота доминирующей первой системной гармоники равна удвоенной рабочей частоте.

С целью обеспечения гальванического разделения цепей, которое имеет важное значение для того, чтобы все устройства со вторичной стороны имели такой же уровень изоляции, как и в классическом преобразователе для поезда переменного тока, выходное напряжение прямоугольной формы входного инвертора подается на дополнительную обмотку главного трансформатора. Эта обмотка рас-

считана таким образом, что кривая напряжения вторичной стороны имеет такие же характеристики, как и в преобразователе для односистемных поездов переменного тока.

Защищенный патентом метод импульсного регулирования

Основная идея преобразования напряжения постоянного тока базируется на передаче активной мощности с помощью напряжения прямоугольной формы частотой порядка 100 Гц. Это значит, что входной инвертор регулирует сетевое напряжение U_L таким образом, что на обмотку трансформатора поступает напряжение меняющейся полярности U_G . По сравнению с системой широтно-импульсной модуляции синусоидальной кривой во входном инверторе частота переключений значительно ниже. В связи с использованием основной частоты в качестве тактовой в большой степени уменьшаются потери в преобразователе, благодаря чему повышается его эффективность.

Выходной ток входного инвертора I_g регулируется подключенными со вторичной стороны сетевыми преобразователями таким об-

разом, чтобы его кривая была ближе к прямоугольной форме. Если бы удалось обеспечить полностью прямоугольную форму кривых напряжения и тока, то мгновенное значение активной мощности было бы величиной постоянной, т. е. из контактной сети потреблялся бы чисто постоянный ток. Однако в связи с индуктивностью рассеяния трансформатора удается достичь лишь трапециoidalной формы кривой тока, но длина переднего фронта полуволны очень мала по сравнению с ее длиной (рис. 4).

Низкочастотные колебания мощности, обусловленные работой схемы входного преобразователя, и ее высокочастотные колебания, вызванные тактовым регулированием сетевых преобразователей, могут быть подавлены с помощью входного фильтра, имеющегося в схеме входного преобразователя (рис. 5). В результате мешающие токи, оказывающие обратное воздействие на сеть, не достигнут предельных значений (рис. 6), причем частоты выше 500 Гц имеют значения, очень далекие от предельных.

Общие задания, касающиеся регулирования и управления работой входного инвертора, воспринимаются компьютером одного из двух сетевых преобразовате-

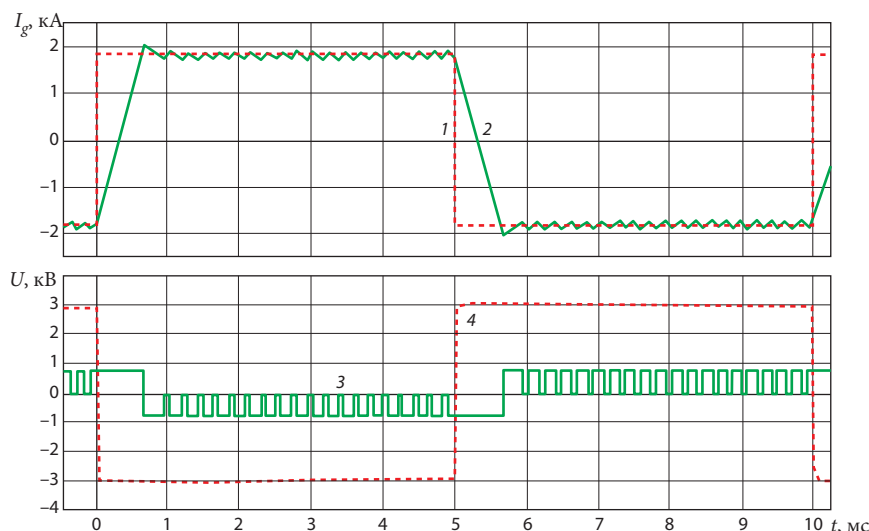


Рис. 4. Кривые изменения в функции времени тока I_g и напряжения U в тяговом режиме при тактовой частоте 100 Гц;

t — время; 1 — задаваемое значение тока I_g ; 2 — истинное значение тока I_g ; 3 — напряжение сетевого регулятора U_g ; 4 — напряжение U_g на выходе входного инвертора

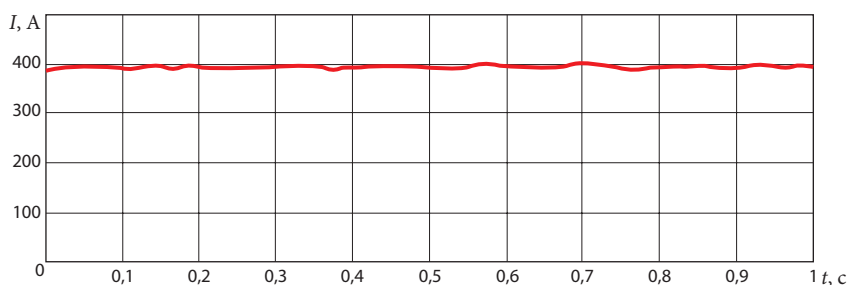


Рис. 5. Изменение во времени тягового тока при движении поезда со скоростью 60 км/ч под контактной сетью напряжением 3,5 кВ постоянного тока

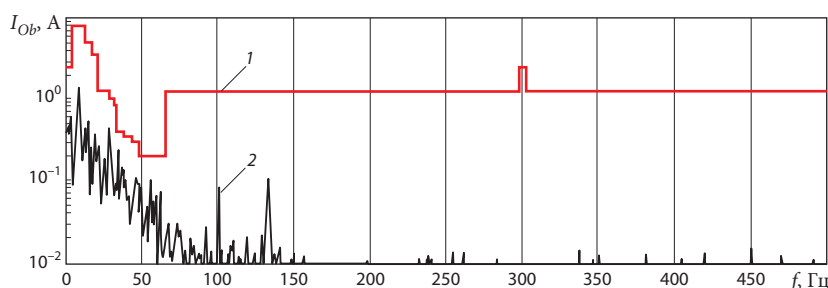


Рис. 6. Частотный спектр высших гармоник тока нагрузки в режиме, соответствующем рис. 5:

I_{Ob} — ток высших гармоник; f — частота; 1 — предельные значения гармоник тока для моторного вагона электропоезда (Италия); 2 — характерный пик на частоте, равной удвоенной рабочей

лей. В иерархии управления этот компьютер является главным. Первая задача регулирования сетевых преобразователей состоит в том, чтобы уровень напряжения в их промежуточных звеньях поддерживался постоянным независимо от тяговой нагрузки. Здесь применен соответствующий современному уровню техники метод регулирования с использо-

ванием поля допусков регулируемой величины. Поле допуска плавно сканируется с целью поддержания номинального значения рабочей частоты сетевых преобразователей в диапазоне от 1 до 2 кГц. Этот метод обеспечивает возможность транспортирования потоков энергии в обоих направлениях, т. е. позволяет применять рекуперативное торможение. Из-за

низких потерь, зависящих от мощности, КПД работы преобразователя под контактной сетью постоянного тока оказался выше, чем на переменном токе.

Ввод в эксплуатацию

После того как были завершены испытания преобразователя на переменном токе напряжением 15 кВ, проводившиеся в рамках допуска его к эксплуатации, была выполнена проверка работы всех систем поезда с новым преобразователем на участке, электрифицированном на постоянном токе напряжением 1500 В. После этого были проведены испытания на линии постоянного тока напряжением 3 кВ в районе Кьяссо, а затем испытательные поездки в Италии по расширенной программе. Короткая длительность фазы испытаний в рамках допуска обусловлена предварительным проведением широкого спектра исследований системы на математической модели, а затем на испытательном стенде. Полученные положительные результаты показали, что выбор этой топологии для регионального поезда TILO был правильным.

B. Guggisberg, P. Dähler. Elektrische Bahnen, 2007, № 6, S. 369–373.

НОВЫЕ КНИГИ

Поплавский А. А. Создание эффективной управляющей системы для оперативного руководства перевозочным процессом на железнодорожном транспорте. — М.: Интекст, 2007. — 184 с.

На сети Российских железных дорог протяженностью 85,5 тыс. км необходимо организовать единое управление перевозочным процессом, поскольку сбой в одном месте может оказывать негативное влияние на работу целых направлений и полигонов сети.

В последние годы создаются центры управления перевозками, где концентрируется диспетчерский аппарат, выполняющий функции оперативного управления перевозочным процессом. При этом существенно возрастает роль информационно-вычислительных комплексов. Необходимо связать воедино многие тысячи АРМ, информационные базы данных, центры управления и вычислительные центры, сети связи. Требуется организовать единое и эффективное функ-

ционирование этой сложной управляющей структуры, чтобы наилучшим образом использовать дорогостоящие технические средства железных дорог.

В исследовании на основе использования новых возможностей информационных технологий решена крупная народнохозяйственная и научно-практическая проблема обоснования методологических принципов построения и проектирования, а также разработки и внедрения конкретных решений по основным вопросам работы автоматизированных диспетчерских центров ОАО «РЖД», являющихся главным звеном управляющей части системы оперативной организации перевозочного процесса на сетевом и дорожном горизонтах управления.

За дополнительной информацией обращайтесь по телефону (499) 317-55-65. Приобрести книгу можно в издательстве «ТрансИнфо» (www.transinfo.ru, тел.: (495) 262-86-24; 262-71-28).