

Питание рельсовых магистралей

Преобразователи частоты для тяговой сети

Герхард Линховер, Филипп Майбах, Никлаус Умбрихт

Железные дороги нуждаются в огромном количестве электроэнергии. Многие из них обладают собственными электростанциями и высоковольтными сетями. Но большинство железных дорог не столь автономны и должны получать электроэнергию из национальных энергосистем. А сделать это не так просто, как кажется на первый взгляд. Многие железнодорожные линии были электрифицированы очень давно и поэтому частота тока их контактной сети отличается от используемой в национальных энергосистемах.

В прежние времена для изменения частоты тока применялись электромеханические (вращающиеся) преобразователи, которые при необходимости дополнялись специальными устройствами, компенсирующими уход частоты в ограниченных пределах. Основным отличием современных решений является то, что теперь мощные преобразователи частоты построены на силовой электронике. Их многочисленные преимущества включают более быстрое время отклика и возможность управления реактивной мощностью.

Преобразователи

Основанные на силовой электронике преобразователи частоты применяются для соединения несинхронизированных или работающих на разных частотах электросетей уже достаточно давно. В основном они построены на тиристорах, коммутирующих сетевое напряжение. Сравнительно недавно для этих целей стали применяться преобразователи, построенные на полупроводниковых ключах и включающие инвертор напряжения с шиной постоянного тока. Отдельную задачу представляет питание однофазных тяговых сетей. Здесь силовая электроника пришла на смену электромеханическим преобразователям только после появления инверторов напряжения.

Прошлое и настоящее

В настоящее время используются три системы электрификации железных дорог.

В странах и регионах, где она была проведена относительно недавно (после появления электронных силовых регуляторов скорости тяговых электродвигателей), тяговая сеть запитывается от сетей общего пользования частотой 50 (60) Гц и, в основном, напряжением 25 кВ.

Но до широкого внедрения силовой электроники применялись другие системы электрификации. В некоторых странах, где электрификация была проведена значительно ранее, применяются системы постоянного тока напряжением 1,5 и 3 кВ. Преимуществом подобных систем является простота регулирования скорости электродвигателей постоянного тока. В ряде стран был выбран переменный ток, используемый для питания коллекторных электродвигателей. Скорость таких электродвигателей тоже довольно легко регулируется, но поскольку для коллектора частота 50 и 60 Гц слишком высока, то используется пониженная частота.

Железные дороги, электрифицированные переменным током пониженной частоты, находятся:

- На восточном побережье США: 25 Гц
- В Швеции и Норвегии: 162/3 Гц
- В Германии, Австрии и Швейцарии: 162/3 Гц

В прошлом для соединения железнодорожной тяговой сети с трехфазной сетью общего пользования применялись электромеханические преобразователи, состоящие из расположенных на одном валу двух электрических машин с разным количеством пар полюсов. Использовались две конструкции

машин. В США и Скандинавии на обоих концах вала устанавливались синхронные машины, в результате чего сети становились «квазисинхронными». Отношение частот было фиксированным и не изменялось. В центральной Европе железные дороги располагали собственными электростанциями, вырабатывающими однофазное напряжение, а также собственными электросетями, независимыми от национальных трехфазных электросетей. Таким образом, национальные и железнодорожные сети жестко не синхронизировались, но отношение частот могло меняться в ограниченных пределах. Для компенсации применялись электромеханические преобразователи специальной конструкции. Это были так называемые машины Шербуса. Синхронные электрические машины устанавливались только со стороны однофазной сети. Коллекторные электродвигатели с фазным ротором применялись только в трехфазных сетях. Дополнительные (маломощные) машины регулировали отклонение частоты вращения ротора, что позволяло изменять скорость в ограниченных пределах.

В последнее время появились преобразователи частоты в виде инверторов напряжения, построенных на силовых полупроводниковых приборах, а выпуск электромеханических преобразователей был прекращен. За последние 15 лет суммарная мощность введенных в эксплуатацию преобразователей частоты составила почти 1000 МВт. Примерно две трети из них были поставлены компанией АББ. Кроме того, в настоящее время заказаны или изготавливаются преобразователи

еще на 600 МВт, и примерно 500 МВт из них приходится на продукцию АББ.

За последние 15 лет суммарная мощность введенных в эксплуатацию преобразователей частоты составила почти 1000 МВт. Примерно две трети из них были поставлены компанией АББ.

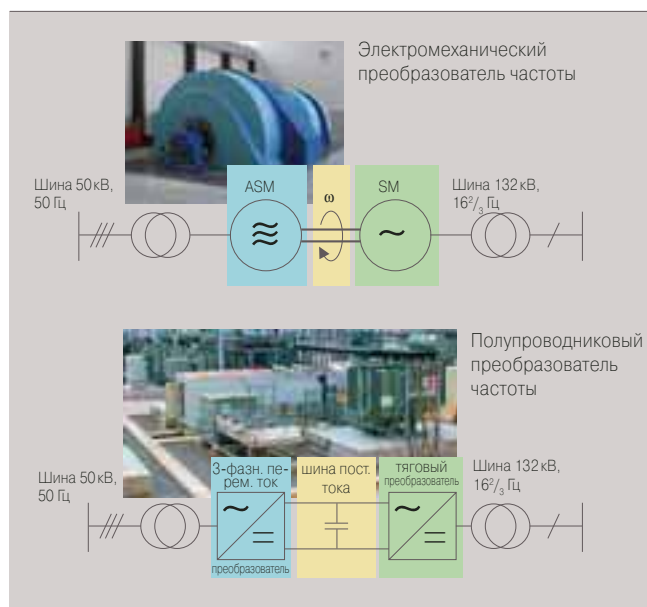
Сравнение с электромеханическими преобразователями

Для подачи питания в однофазные сети обычные преобразователи на коммутирующих сетевое напряжение тиристорах никогда не рассматривались в качестве конкурентов электромеханическим. В отличие от трехфазных сетей алгоритмы коммутации здесь не могут быть сбалансированы, что приводит к недопустимым искажениям напряжения. Тем не менее, было построено некоторое число прямых преобразователей (cycloconverter), но они производили большое количество гармоник, мешающих работе обеих сетей. Другим недостатком подобных преобразователей было формирование ярко выраженной второй гармоники в однофазной сети. Помимо отрицательного воздействия на однофазную сеть, она была вредна и для трехфазной сети.

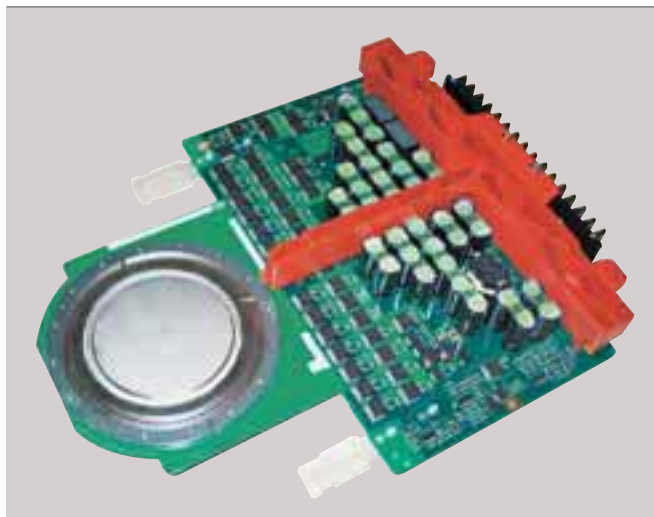
И только после появления мощных полупроводниковых ключей на базе GTO (запираемых тиристоров) создание инверторов напряжения стало реально возможным.

Преобразование трехфазного напряжения в однофазное предъявляет и к вращающимся, и к электронным преобразователям частоты значительно более высокие требования, чем синхронизация двух трехфазных сетей. Первая принципиальная проблема заключается в необходимости подавления второй гармоники в однофазной сети. В электромеханических преобразователях вызываемые ею колебания момента и мощности компенсировались за счет вращения массивных деталей. Возникающие вибрации должны были поглощаться амортизаторами и основанием установки. Все это усложняло конструкцию машины и ее основания.

1 Сверху – электромеханический преобразователь с асинхронной (ASM) и синхронной (SM) электрическими машинами. Снизу – полупроводниковый преобразователь частоты для наружной установки.



2 IGCT – запираемый тиристор с интегрированным управлением (слева) и блок управления (справа). Блок управления и тиристор установлены на многослойной печатной плате со сверхнизкой индуктивностью.



В используемых с данной целью инверторах напряжения для подавления второй гармоники использовались фильтры, настроенные на удвоенную частоту однофазной сети.

Еще одной проблемой стало то, что система должна была не только управлять активной и реактивной энергией, но в случае повреждения трехфазной сети она должна была переходить в автономный режим. Более того, она должна была стать единственным источником питания для отдельного участка железнодорожной тяговой сети и быть способной войти в синхронизм с другими участками после устранения повреждения (рис. 1).

Только после появления мощных полупроводниковых ключей на базе GTO (запираемых тириستоров) стало возможным создание инверторов напряжения.

Примеры преобразователей частоты

Полупроводниковые преобразователи от АББ имеют долгую историю. Первые тяговые преобразователи были введены в эксплуатацию в Швеции. Однако данная технология не была пригодна для центральной Европы, где структура тяговых электросетей была иной, требования к качеству электроэнергии – более высокими. Первые два современных преобразователя

частоты номинальной мощностью 25 МВА каждый были введены в эксплуатацию в 1994 г. в Гюбиаско (Швейцария). Вслед за этим успешным проектом технология GTO получила дальнейшее развитие, и в 1996 г. в Бремене (Германия) был введен в эксплуатацию преобразователь на 100 МВА. Он был построен на «жесткоприводных» GTO. Это были GTO с управляющим электродом концентрической формы, соединенным с блоком управления проводником со сверхнизкой индуктивностью. В результате коммутационная способность тириستоров значительно возросла. Построенная по данной технологии железнодорожная преобразовательная подстанция номинальной мощностью 2 x 50 МВт/67 МВА была введена в строй в 1999 г. в Карлсфельде (Германия).

Следующим шагом стала разработка нового полупроводникового прибора – запираемого тиристора с интегрированным управлением (IGCT)¹⁾. Он стал дальнейшим развитием GTO и обладал еще большей коммутационной способностью и меньшими потерями. Низкоиндуктивный блок управления стал его интегрированной частью. Компактность конструкции позволила разработать унифицированные преобразовательные модули, из которых можно строить преобразователи любой мощности. Сегодня нашим клиентам «верой и правдой» служит 21 преобразователь мощностью от 15 до 20 МВт. Благодаря модульному принципу, на их основе можно построить более мощные преобразователи с шагом приращения мощности в 15 МВт. Для этого преобразовательные модули и составленные из них преобразователи следует включать параллельно.

Данное поколение преобразователей отличается недостижимой ранее мощностью, а также компактностью и сокращенными сроками монтажа и ввода в эксплуатацию. Положительные отзывы заказчиков свидетельствуют, что унифицированные преобразователи от АББ полностью удовлетворяют их требованиям.

Базовый модуль

Сердцем преобразовательного модуля является прибор IGCT (см. рис. 2), объединяющий преимущества GTO и IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором), такие как надежность, низкие коммутационные и омические потери, а также высокую скорость коммутации. Характеристики этого полупроводникового прибора в данной области применения (высокая мощность и напряжение) остаются непревзойденными. Например, применяемые для этой цели высоковольтные IGBT (IEGT) обладают сравнимыми коммутационными потерями при той же площади кремниевого кристалла, но омические потери в них значительно выше. Кроме того, применение IGCT позволяет максимально упростить схему преобразователя. Например, однофазный модуль требует очень простого снабберного каскада, в то время как для GTO данный каскад отличается большой сложностью. Это обеспечивает выигрыш в цене, компактности и величине потерь.

Потери в полупроводнике происходят и когда он проводит ток, и когда он заперт. Подобные

¹⁾ Дополнительные сведения о приборах IGCT можно получить из статьи «Маленькая точка может изменить мир» на сс. 15–18 этого выпуска АББ Ревю.

Преобразователи

потери могут быть минимизированы снижением частоты коммутации. С другой стороны, частота коммутации не может быть слишком низкой из-за генерируемых гармоник. Таким образом, необходим разумный компромисс между потерями и гармониками. Оригинальным решением данной дилеммы является схема с многоуровневой топологией. Она позволяет преобразователю работать с относительно невысокой частотой коммутации и в то же время обеспечивает низкий уровень гармоник.

Трехуровневые однофазные модули формируют напряжение переменного тока из постоянного напряжения. Эти модули можно рассматривать в качестве трехпозиционных переключающих контактов, подключающихся к положительному (+), нулевому (0) или отрицательному (-) выводу шины постоянного тока (рис. 3).

Два таких модуля объединяются в трехуровневый двухфазный модуль. Все IGCT охлаждаются с обеих сторон. Охлаждающая жидкость (водно-гликолевая смесь) поступает в радиаторы по трубкам. Компактность конструкции достигается за счет размещения модулей друг над другом. При такой компоновке минимизируется паразитная индуктивность, что позволяет использовать полупроводниковые компоненты с максимальной эффективностью. Кроме того, легкий доступ к IGCT облегчает их замену при необходимости. Замена IGCT производится с помощью простых инструментов и не затраги-

вает контур охлаждения. Пример двухуровневой компоновки показан на рис. 4.

IGCT объединяет достоинства GTO и IGBT: надежность, низкие коммутационные и активные потери, а также высокое быстродействие.

Пример: преобразователь мощностью 15–20 кВт

Схема преобразовательной подстанции показана на рис. 5.

Преобразователь на 50 Гц (SR50)

Преобразователь на 50 Гц характеризуется следующим:

■ **Конструкция.** В состав преобразователя входят два стандартных трехфазных трехуровневых модуля. Два однофазных инвертора объединены в стойку и составляют двухфазный модуль. Двухфазный модуль трехуровневого преобразователя состоит из восьми IGCT с подключенными к ним восемью демпфирующими диодами, а также из четырех демпфирующих диодов, подключенных к нейтральному проводнику. Блок управления

и GCT формируют общее устройство – IGCT. Цепь ограничителя выполняет ограничение di/dt и напряжения. Она включает токоограничивающие реакторы, конденсаторы и ограничивающие диоды.

■ Схемотехника и способ управления.

Преобразователь на 50 Гц имеет 12-фазную конфигурацию. Таким образом, гармоники генерируются только 12 импульсами ($n = 12k \pm 1$; $k = 1, 2, 3, 4, \dots$). В зависимости от выбранной частоты коммутации полупроводникового ключа и метода модуляции, некоторые из этих гармоник могут и не формироваться. При необходимости гармоники могут быть подавлены до требуемого уровня линейным фильтром.

Преобразователь на $16\frac{2}{3}$ Гц

Преобразователь на $16\frac{2}{3}$ Гц характеризуется следующим:

■ **Конструкция.** В состав преобразователя входят четыре стандартных трехфазных трехуровневых модуля. Два установленных друг на друга однофазных инвертора составляют двухфазный модуль, который может использоваться в качестве однофазного Н-моста. Состав двухфазного модуля такой же, как в описанном выше преобразователе на 50 Гц.

■ Схемотехника и способ управления.

Преобразователь на $16\frac{2}{3}$ Гц имеет 8-ступенчатую конфигурацию. Уровни выходного напряжения преобразователя суммируются последовательно включенными входными обмотками трансформаторов четырех смещаемых импульсами 3-уровневых Н-мостов. Каждый из Н-мостов работает в 3-уровневом режиме, используя обычную ШИМ (широтно-импульсную модуляцию).

Ограничитель напряжения

Когда напряжение шины постоянного тока превысит верхний предел, оно погасится до нижнего предела на резисторе (рис. 5в). Таким образом, напряжение постоянного тока постоянно удерживается в заданных границах.

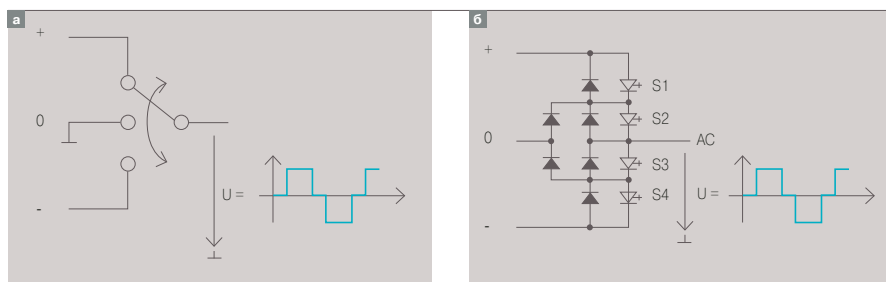
Шина постоянного тока

Со стороны постоянного тока все двухфазные модули соединены друг с другом общей шиной с выводами для измерения напряжения и подключения конденсаторов и фильтров.

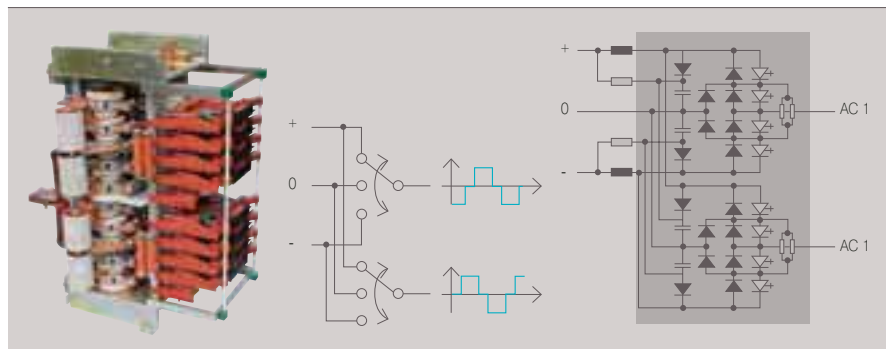
Шина постоянного тока формирует соединение между преобразователями на 50 и $16\frac{2}{3}$ Гц. Она включает следующие основные компоненты:

- непосредственно подключенная батарея конденсаторов, используемая для накопления энергии,
- фильтр на 33,4 Гц для демпфирования колебаний частоты тяговой сети (рис. 5д),

3 Принцип работы трехуровневого преобразователя (а) и схема включения полупроводниковых приборов (б)



4 Конструкция и электрическая схема двухфазного модуля





■ оба фильтра шины постоянного тока вместе с непосредственно подключенными к ней конденсаторами служат также накопителями энергии, что необходимо для управления. Объем накопленной энергии достаточен для того, чтобы в случае неожиданного полного (100%) отключения нагрузки не допустить резкого возрастания напряжения шины постоянного тока.

Многоуровневая схемотехника позволяет преобразователю работать с относительно невысокой частотой коммутации и в то же время обеспечивает низкий уровень гармоник.

Фильтр на 33,4 Гц

Полосовой фильтр на 33,4 Гц предназначен для демпфирования колебаний частоты тяговой сети (рис. 5д). Несмотря на высокую добротность, составляющую примерно 200 (крутая АЧХ), полоса пропускания фильтра в стороны от центральной частоты достаточно велика, благодаря высокой емкости его конденсаторов. Это позволяет демпфировать отклонения частоты тяговой сети в пределах полосы пропускания. Кроме того, вносимые фильтром потери относительно невелики, поскольку потери на конденсаторах значительно ниже потерь на резисторах.

ФВЧ

ФВЧ подавляет гармоники высших порядков, формируемые в основном тяговой сетью (рис. 5е). Он представляет собой второй каскад

фильтрации с полосой пропускания от пятой гармоники частоты тяговой сети и ниже. Ярко выраженные третья и пятая гармоники напряжения тяговой сети соответствуют второй, четвертой и шестой гармоникам в шине постоянного тока. Данный фильтр частично подавляет высшие гармоники, формирующиеся в трехфазной и тяговой сетях, а также в результате пульсаций. Основное же подавление производится конденсаторами, подключенными непосредственно к инвертору. Таким образом, при расчете параметров данных компонентов следует учитывать ожидаемый уровень гармоник в обеих сетях.

Контейнер с преобразователем

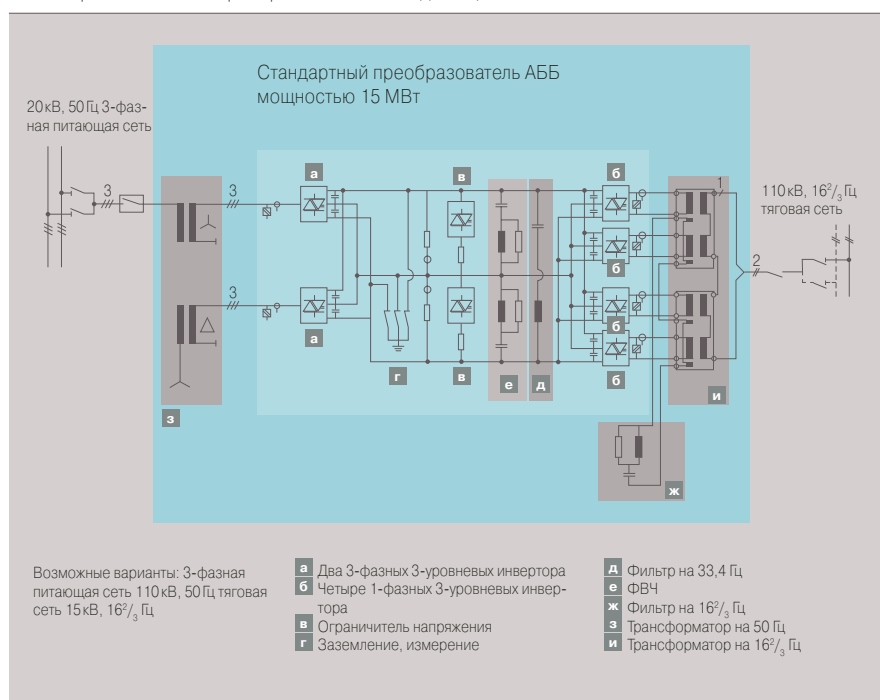
Преобразователь с соответствующей системой управления поставляется полностью собранным и испытанным на заводе – в контейнере, стойком

к атмосферным воздействиям. Система охлаждения поставляется в отдельном контейнере. Оба контейнера смонтированы на общей раме. Внутреннее устройство контейнера с преобразователем показано на рис. 6.

Трансформаторы преобразователя

■ **Трансформатор на 50 Гц.** Трансформатор на 50 Гц в 50-герцовом преобразователе запитан от двух 3-фазных мостов, построенных на IGBT. Трехфазный трансформатор состоит или из 2-ярусного Ш-образного сердечника с хомутом посередине или двух Ш-образных сердечников, помещенных в один бак. На каждом стержне сердечника имеется входная (высоковольтная) и выходная (соединенная с инвертором) обмотки. Две части высоковольтной обмотки соединены последовательно.

5 Электрическая схема преобразовательной подстанции



Преобразователи

Высоковольтные обмотки соединены звездой. Две обмотки со стороны инвертора сдвинуты относительно друг друга на 30° (соединение звезда/треугольник), что позволяет инвертору работать в 12-фазном режиме.

Общая формула соединения: YN y0 d11

■ **Трансформатор на $16^{2/3}$ Гц.** Трансформатор на $16^{2/3}$ Гц преобразователя на $16^{2/3}$ Гц служит для формирования четырех почти синусоидальных парциальных однофазных напряжений номинальной частотой $16^{2/3}$ Гц. Трансформатор состоит из четырех однофазных блоков. Прямоугольные парциальные напряжения формируются в шине постоянного тока четырьмя однофазными

преобразовательными мостами IGCT, использующими ШИМ и питающими четыре обмотки трансформатора со стороны инвертора. Суммирование парциальных напряжений и формирования напряжения тяговой сети производится в высоковольтной обмотке. Фильтр подключается последовательно к третьим обмоткам или со стороны тяговой сети.

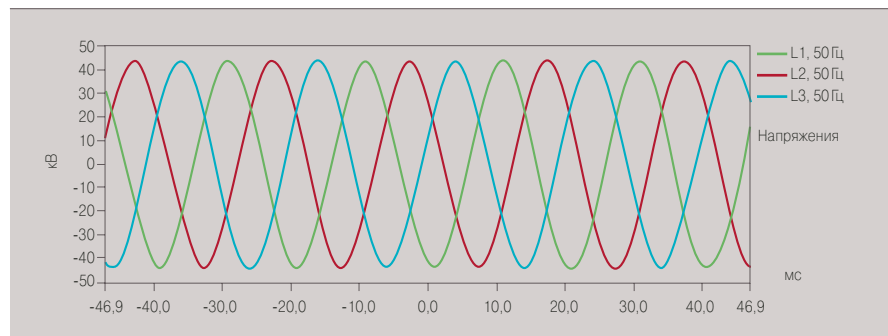
Линейный фильтр

Со стороны сети $16^{2/3}$ Гц фильтр используется для подавления и без того невысоких гармонических искажений, вносимых преобразователем. В некоторых случаях это требуется делать и со стороны сети 50 Гц.

Выходные напряжения IGCT-преобразователя представляют собой прямоугольные импульсы управляемой ширины. По сравнению с типичными электрическими машинами спектр выходного

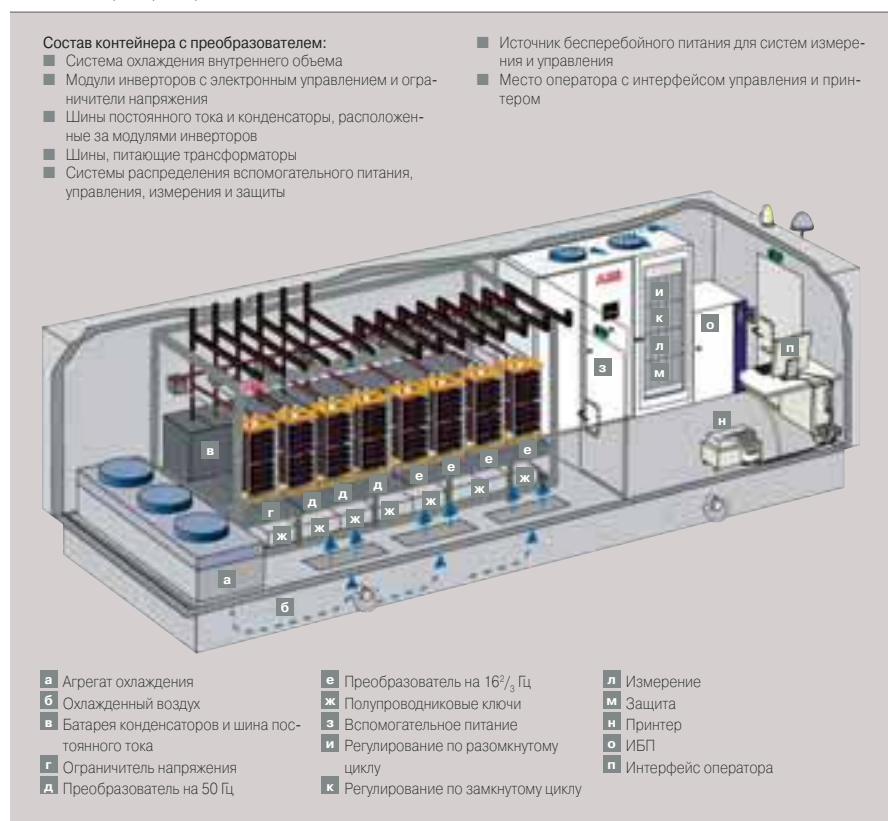
По сравнению с типичными электрическими машинами, спектр выходного напряжения данного преобразователя отличается крайне невысокими низшими гармониками.

7 Напряжения трех фаз в точке подключения к сети 50 Гц



напряжения данного преобразователя отличается крайне невысокими низшими гармониками. По отношению к тяговой сети преобразователь является источником гармоник напряжения. Индуктивность трансформатора оказывает

8 Контейнер с преобразователем



Преимущества полупроводниковых преобразователей частоты по сравнению с вращающимися преобразователями

Цена

С учетом стоимости вспомогательных систем, сборки и монтажа, капитальные и эксплуатационные расходы для полупроводниковых преобразователей значительно ниже.

КПД

КПД полупроводниковых преобразователей достигает 97% (включая трансформаторы, соединяющие их с обеими сетями) в широком диапазоне мощностей. КПД вращающихся преобразователей колеблется от 90 до 95% в зависимости от их мощности и рабочей точки.

Коэффициент технической готовности

Коэффициент технической готовности вращающихся преобразователей значительно ниже из-за длительных простоев для выполнения технического обслуживания и ремонта.

Характер работы

Из-за отсутствия массивных вращающихся деталей полупроводниковые преобразователи малоинерционны. Для них не существует проблемы поддержания стабильности напряжения в случае помех со стороны тяговой сети, вызванных колебаниями ротора.

демпфирующий эффект, особенно заметный для высших гармоник тока. Это положительно влияет на качество электроэнергии в тяговой сети. Положительное влияние индуктивности трансформатора усиливается фильтром, осуществляющим дальнейшее подавление гармоник. В результате значения гармонических искажений становятся даже ниже требуемых. На рис. 7 показана практически идеальная форма напряжения в точке подключения тяговой сети к преобразователю (осциллограмма, записанная во время ввода в эксплуатацию).

Выводы

Целенаправленное развитие преобразователей отвечает современным требованиям и поэтому продукция АББ занимает значительную долю этого рынка. Модульная конструкция позволяет легко собирать преобразователи различной мощности. В настоящее время компания АББ ведет строительство преобразователей мощностью 30 МВт и выше. Мы прилагаем значительные усилия к тому, чтобы оставаться первыми на этом перспективном рынке.

8 Преобразовательная подстанция мощностью 15–20 МВт, соединяющая национальную энергосистему на 50 Гц с тяговой сетью на $16\frac{2}{3}$ Гц. Слева находится трансформатор на 50 Гц с установленными сверху на мостике трехфазными фильтрами. Посередине – контейнер с преобразователем, справа – однофазный НЧ трансформатор.



Герхард Линховер

Филипп Майбах

Никлаус Умбрихт

ABB Automation Products

Турги, Швейцария

gerhard. o. linhofer@ch. abb. com

philippe. maibach@ch. abb. com

niklaus. umbricht@ch. abb. com

Литература

- [1] Gaupp, O., Linhofer, G., Lochner, G., Zanini, P. Powerful static frequency converters for transalpine rail routes. ABB Review 5/95, 4–10.
- [2] Lönard, D., Northe, J., Wensky, D. Statische Bahnstromrichter – Systemübersicht ausgeführter Anlagen. Elektrische Bahnen 6/95, 179–190.
- [3] Mathis, P. Statischer Umrichter Giubiasco der Schweizerischen Bundesbahnen. Elektrische Bahnen 6/95, 194–200.
- [4] Steimer, P., Grüning, H., Werninger, J., Dähler, P., Linhofer, G., Boeck, R. Series connection of GTO thyristors for high-power static frequency converters. ABB Review 5/96, 14–20.
- [5] Steimer, P., Grüning, H. P., Werninger, J., Carroll, E., Klaka, S., Linder, S. IGCT – a new, emerging technology for high-power, low-cost inverters. ABB Review 5/1998, 34–42.
- [6] Meyer, M., Thoma, M. Netzkompatibilitätsstudie und –messungen für die Umrichteranlage Wimmis. Elektrische Bahnen 12/2006, 567–574.
- [7] Jampen, U., Thoma, M. Statische Frequenz-umrichteranlage Wimmis. Elektrische Bahnen 12/2006, 576–583.