

# Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей

**Силовая электроника остается, возможно, одной из последних областей техники, где новые схемные решения еще долго будут востребованными, несмотря на кажущуюся простоту конфигураций силовых каскадов. Использование схемотехнических приемов при проектировании мощных преобразователей до сих пор позволяет создавать устройства с принципиально новыми возможностями. Одной из наиболее интересных схемных задач в силовой преобразовательной технике является последовательное соединение силовых модулей и каскадов, построенных на их основе. Многоуровневая топология позволяет использовать ключи со стандартным рабочим напряжением 1200/1700 В в высоковольтных конверторах, необходимых на транспорте и в энергетике. Кроме того, увеличение выходной мощности за счет повышения напряжения является, пожалуй, единственным решением для сверхмощных применений, когда исчерпаны возможности параллельного соединения и токовая нагрузка на соединительные шины становится недопустимо высокой.**

**Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

## Введение

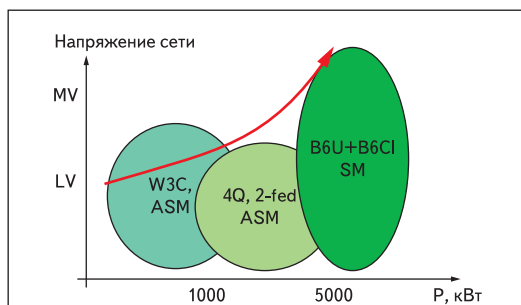
Одним из наиболее интересных применений, где необходимы мощные высоковольтные преобразователи, является ветроэнергетика. Этот раздел силовой электроники является приоритетным направлением деятельности дизайнерского центра фирмы SEMIKRON, который более 30 лет занимается проектированием и производством преобразователей для альтернативных источников энергии. Много лет компания является мировым лидером в области производства подобных изделий, а ярким примером лидерства является то, что в 57% ветрогенераторов мощностью от 500 кВт до 1,5 МВт, работающих в энергосистемах Европы, Америки и Австралии используются конверторы SEMIKRON. В настоящее время в разработке находится преобразователь с выходной мощностью 5 МВт. Суммарная мощность силовых блоков SEMIKRON, используемых в ВЭУ по всему миру, превышает 10 ГВт.

Общая тенденция повышения мощности и изменения архитектуры ВЭУ показана на рис. 1. Как демонстрирует график, увеличение мощности неизбежно приводит к одновременному повышению напряжения сети, что обусловлено необходимостью снижения токовых нагрузок на линии электропередачи. Поэтому в современных энергетических установках вместо низковольтного диапазона напряжения LV (Low Voltage) используется диапазон средних и высоких напряжений MV (Medium Voltage).

На первый взгляд для создания MV-конверторов рациональнее всего использовать высоковольтные силовые ключи, предлагаемые рядом фирм, наиболее известными из которых являются Mitsubishi и EUPEC/Infineon. В настоящее время производятся модули IGBT с рабочим напряжением 3,3; 4,5; 6,5 кВ, в разработке находятся ключи, рассчитанные на 10 кВ. Компания ABB выпускает высоковольтные IGCT (Insulated Gate Controlled Thyristor)-модули и преобразователи на их основе. Однако, по мнению специалистов компании SEMIKRON, такие решения, несмотря на кажущуюся схемную простоту, малоэффективны с экономической и технической точек зрения. Основными недостатками преобразователей, построенных на высоковольтных ключах, являются:

- высокая стоимость;
- сложность обслуживания;
- отсутствие единых стандартов;
- небольшое количество производителей, сложность поиска замены;
- низкий КПД.

Сказанное подтверждается диаграммами (рис. 2), позволяющими сравнить КПД преобразователей, построенных на силовых ключах трех классов напряжения (1700; 3300; 6500 В). В анализируемых модулях используются кристаллы, имеющие одинаковую суммарную эффективную площадь, что необходимо для корректности сравнения. Как показывают приведен-



**Рис. 1.** Тенденции развития ВЭУ:

W3C ASM — асинхронный генератор с управляемым выпрямителем; 4Q 2-fed ASM — асинхронный генератор с двойным питанием и 4-квadrантным преобразователем; B6U+B6CI SM — синхронный генератор с выпрямителем и инвертором

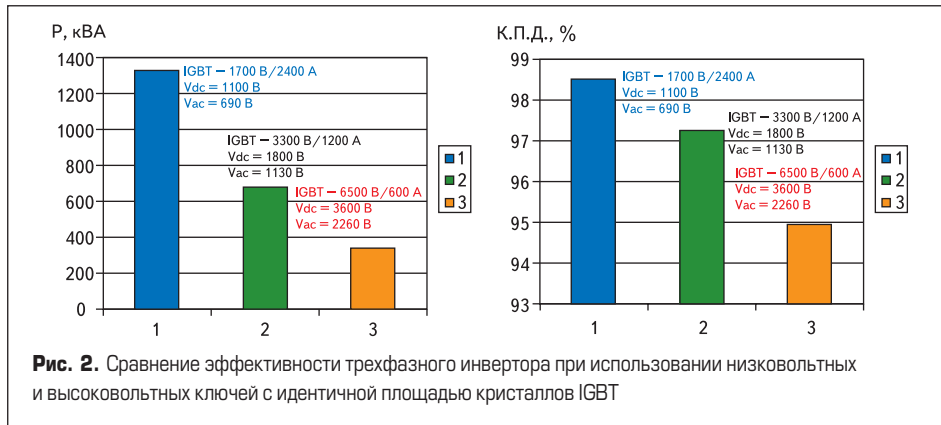


Рис. 2. Сравнение эффективности трехфазного инвертора при использовании низковольтных и высоковольтных ключей с идентичной площадью кристаллов IGBT

ные данные, применение низковольтных транзисторов IGBT с рабочим напряжением 1700 В позволяет создавать преобразовательные устройства с большей мощностью и более высоким КПД.

Расчеты мощности и эффективности выполнены для трехфазного инвертора при следующих условиях эксплуатации:

- напряжение DC-шины V<sub>dc</sub> = 1100/1800/3600 В;
- выходное напряжение преобразователя V<sub>ac</sub> = 690/1130/2260 В;
- частота коммутации F<sub>sw</sub> = 3,6 кГц;
- cos φ = 0,9.

Решение вопроса об использовании стандартных низковольтных ключей в высоковольтных областях стало возможным с появлением так называемых многоуровневых схем, приобретающих все большую популярность в силовой электронике. Развитие многоуровневых технологий связано с возрастающими требованиями по одновременному увеличению мощности и снижению потерь преобразовательной техники. Повышение мощности за счет наращивания тока (например, при параллельном соединении) имеет физические пределы, связанные со значительным возрастанием потерь проводимости и переключения при определенном уровне мощности. Справедливости ради следует отметить, что многоуровневые схемы, конечно, имеют более сложную архитектуру и алгоритмы управления, что компенсируется их высокой технической и экономической эффективностью.

Одной из областей техники, где проблема наращивания мощности особенно актуальна, является ветроэнергетика. В современной ВЭУ используются новейшие технологии и последние достижения механики, электроники, аэродинамики. В соответствии с европейскими стандартами к энергосистеме не может быть подключен генератор мощностью менее 1 МВт, а для снижения стоимости 1 кВт/ч ветроэнергии желательно, чтобы мощность единичной ВЭУ составляла 5–10 МВт. Особенно это справедливо по отношению к наиболее популярным сейчас офшорным (установленным в море) ветроэлектростанциям, в которых стоимость инфраструктуры может превышать расходы на установку, монтаж и обслуживание. Для таких станций возможности стандартных технологий практически исчерпаны.

Использование в ветротурбинах стандартных низковольтных (LV, с напряжением менее 1 кВ) генераторов переменного тока становится проблематичным при токах в несколько кило-

ампер, а стоимость 1 кВт энергии при этом начинает превышать допустимые пределы. Одним из возможных решений для данного диапазона мощности, особенно при работе на переменной частоте, является применение статических преобразователей, работающих в MV-диапазоне при напряжении 3–6 кВ и выше.

Безредукторные мотор-генераторы с постоянными магнитами, использование которых наиболее оправданно при низких скоростях вращения, имеют гораздо более простую конструкцию и позволяют получить большую мощность, чем наиболее распространенные в настоящее время асинхронные машины. Правда, в отличие от последних, их работа невозможна без конвертора соответствующей мощности, что и ограничивает широкое применение машин такого типа. Для работы с ними SEMKRON разрабатывает оригинальные схемотехнические решения, позволяющие создавать многоуровневые преобразователи на базе низковольтных ключей. Ниже приводится описание архитектуры высоковольтного

конвертора и его схемы, а также примеры расчетов и экспериментальные результаты.

### Структурная схема

Предлагаемая схема высоковольтного преобразователя напряжения (или MVC — Medium Voltage Converter), допускающая параллельное и последовательное соединение нескольких конверторов, экспериментально проверена и запатентована в Европе и США (патент DE 101 14 075.4 от 22.03.2001). Она широко применяется в ветроэнергостанциях, расположенных по всему миру. Концепция SEMKRON предполагает использование низковольтных силовых ключей с рабочим напряжением 1200 и 1700 В для построения высоковольтных многоуровневых преобразователей. Каждый «уровень» или элементарная ячейка DC/AC-преобразователя состоит из двух узлов: чопперного ключа и выходного инвертора, схема одной ячейки и способ их соединения показаны на рис. 3.

Высоковольтная ВЭУ, показанная на рис. 3, состоит из генератора мощностью 1,5 МВт с выходным напряжением 3 кВ, высоковольтного выпрямителя и некоторого количества низковольтных DC/AC-инверторов с повышающими выходными трансформаторами. Важной особенностью многоуровневой высоковольтной концепции SEMKRON является то, что низковольтные ключи работают в пределах ОБР (области безопасной работы). Кроме того, подобная схема позволяет осуществлять регулирование выходного тока, напряжения, cos φ и компенсацию реактивной мощности.

Выпрямитель (управляемый или неуправляемый) размещается вблизи трехфазного

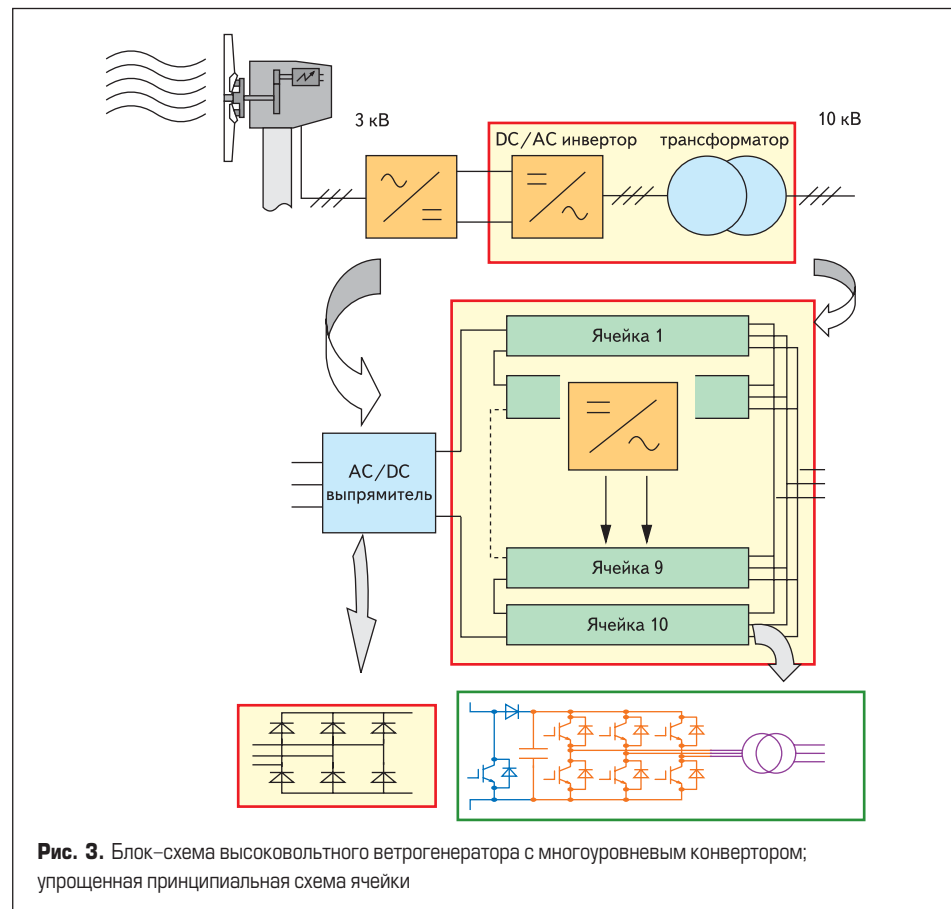


Рис. 3. Блок-схема высоковольтного ветрогенератора с многоуровневым конвертором; упрощенная принципиальная схема ячейки

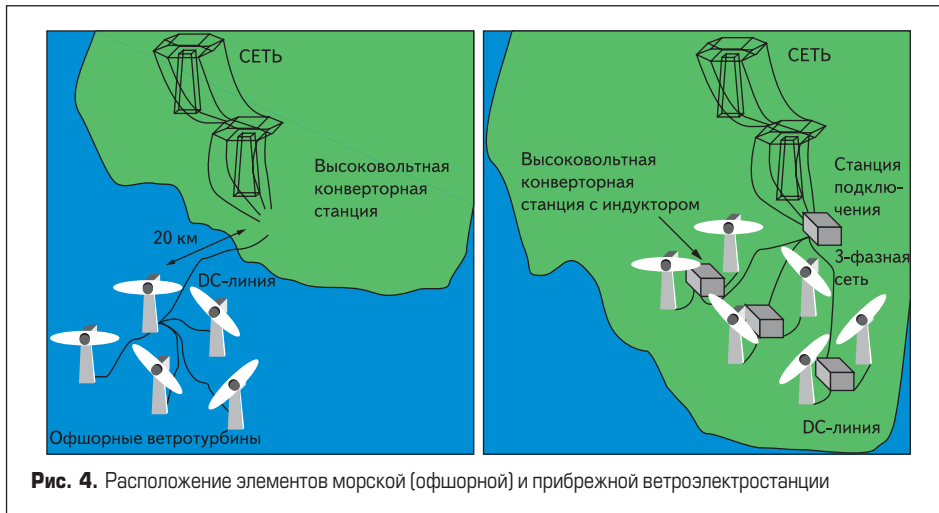


Рис. 4. Расположение элементов морской (офшорной) и прибрежной ветроэлектростанции

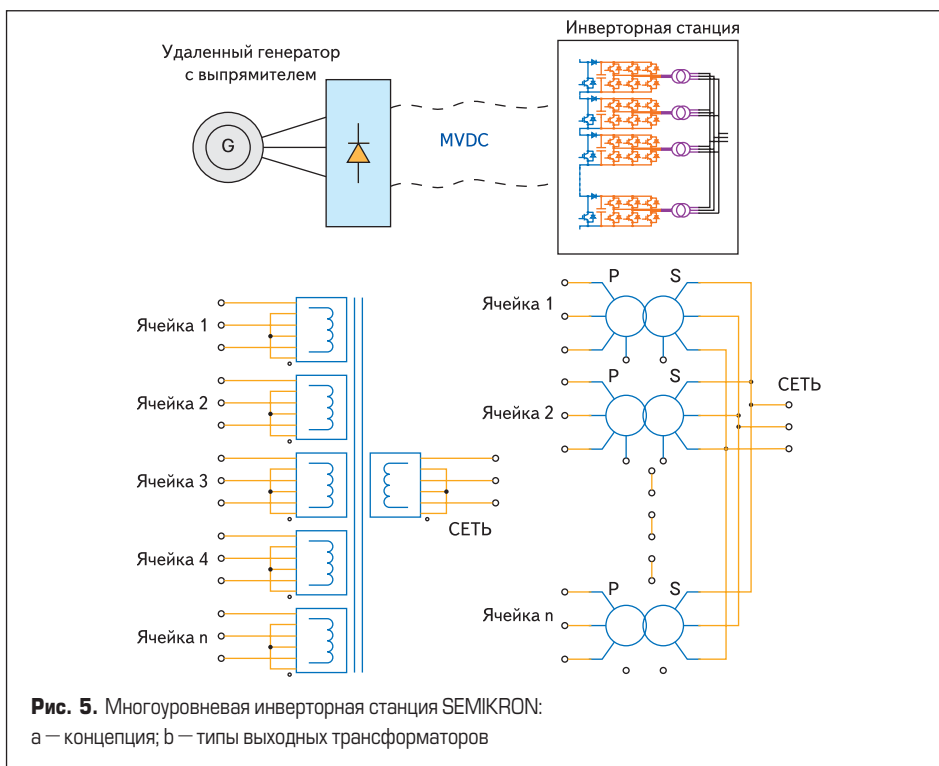


Рис. 5. Многоуровневая инверторная станция SEMIKRON: а — концепция; б — типы выходных трансформаторов

(или многофазного) генератора, а конверторная станция может находиться в нескольких километрах от генератора (офшорная станция) или в непосредственной близости (береговая станция), как показано на рис. 4. Во втором случае, когда распределенная индуктивность подводящих проводов невелика, между выпрямителями и инверторами подключаются индуктивности, для того чтобы отдельные генераторы можно было отключать, шунтируя их выход с помощью чопперных ключей, входящих в состав инверторов. С помощью этих индуктивностей, как будет показано далее, также осуществляется регулирование напряжения питания инверторных ячеек.

Схема, приведенная на рис. 5а, объясняет основную идею многоуровневой концепции SEMIKRON. Входные чопперные ключи (выделены синим цветом) необходимы для объединения инверторных ячеек в составе высоковольтной станции, регулирования напряжения ячеек, отключения или исключения «уровней» в случае неисправности. Они управляются сигналами центрального контроллера-супервизора MVC по волоконно-оптическому кабелю.

Супервизор изменяет количество работающих ячеек или управляет ими с помощью ШИМ-сигнала в зависимости от выходного напряжения генератора, поддерживая напряжение на шине постоянного тока каждого инвертора в заданных пределах. Контрольные сигналы сдвигаются по фазе, благодаря чему удается снизить уровень пульсаций тока. Это позволяет перенести спектр гармоник от переключения в область высоких частот и уменьшить величину сглаживающих индуктивностей.

В ячейках многоуровневого преобразователя используются только стандартные низковольтные элементы: силовые ключи, конденсаторы DC-шины, контакторы. Изоляция между ячейками обеспечивается благодаря большому расстоянию между ними, а также за счет конструкции выходного трансформатора, с помощью которого выходы элементов MVC подключаются к сети. Естественно, что сигналы управления ячейками должны иметь соответствующую изоляцию, эта проблема решается с помощью волоконно-оптических линий связи. Подключение MVC, имеющего N ячеек, к сети осуществляется двумя способами (рис. 5):

- с помощью 1 трансформатора, имеющего N трехфазных первичных обмоток и 1 трехфазную выходную обмотку;
  - с помощью N трехфазных трансформаторов с 1 первичной и 1 вторичной обмоткой.
- В зависимости от количества ячеек, выходной мощности, стоимости изготовления, массо-габаритных показателей выбор может быть сделан в пользу одного или другого варианта.

### Алгоритм управления

Алгоритм управления инверторами выбирается таким образом, чтобы форма выходного напряжения, являющегося суммой сигналов ячеек, была максимально близка к синусоидальной. Предлагаемая структура имеет два принципиальных достоинства:

- низкий уровень искажений сигнала благодаря большому количеству токовых составляющих;
- высокая эффективность за счет применения низковольтных IGBT при низкой частоте коммутации: как правило, при  $F_{sw} = 1,5$  кГц обеспечивается наилучшее соотношение между качеством сигнала и уровнем потерь.

Центральный супервизор, построенный на контроллере TI 320LF2704, осуществляет по оптическому кабелю управление чопперами и инверторами ячеек преобразователя и проводит мониторинг состояния каждой ячейки. Как было указано выше, предлагаемая схема позволяет изменять коэффициент мощности и регулировать практически все характеристики преобразователя: выходной ток и напряжение, уровень гармонических искажений и  $\cos \phi$ . Структурная схема одной ячейки показана на рис. 6: красными прямоугольниками отмечены узлы, используемые в основных силовых цепях, синими — пассивные элементы и контакторы, зелеными — устройства управления. Работа ячейки по командам супервизора осуществляется в следующей последовательности:

#### Пуск преобразователя

- Плата Watch Dog замыкает контактор S0, напряжение подается на источник питания ячейки, включаются все узлы ячейки.
- Производится заряд конденсаторов DC-шины через резисторы предзаряда и антипараллельные диоды IGBT.
- Размыкается 3-фазный контактор S1 системы предзаряда.
- Замыкается основной силовой трехфазный контактор S2 на выходе инвертора, выход инвертора подключается к сети через трансформатор.
- Сигналы управления подаются на ключи инвертора.
- Размыкается контактор S3, параллельный цепи питания инвертора.
- Сигнал управления подается на чопперный ключ.
- Сигналы мониторинга состояния ячеек поступают на супервизор.

#### Остановка преобразователя

- Выключается чопперный каскад.
- Замыкается цепь питания инвертора через контактор S3.
- Снимаются сигналы управления инвертором.
- Выключается основной контактор S2.

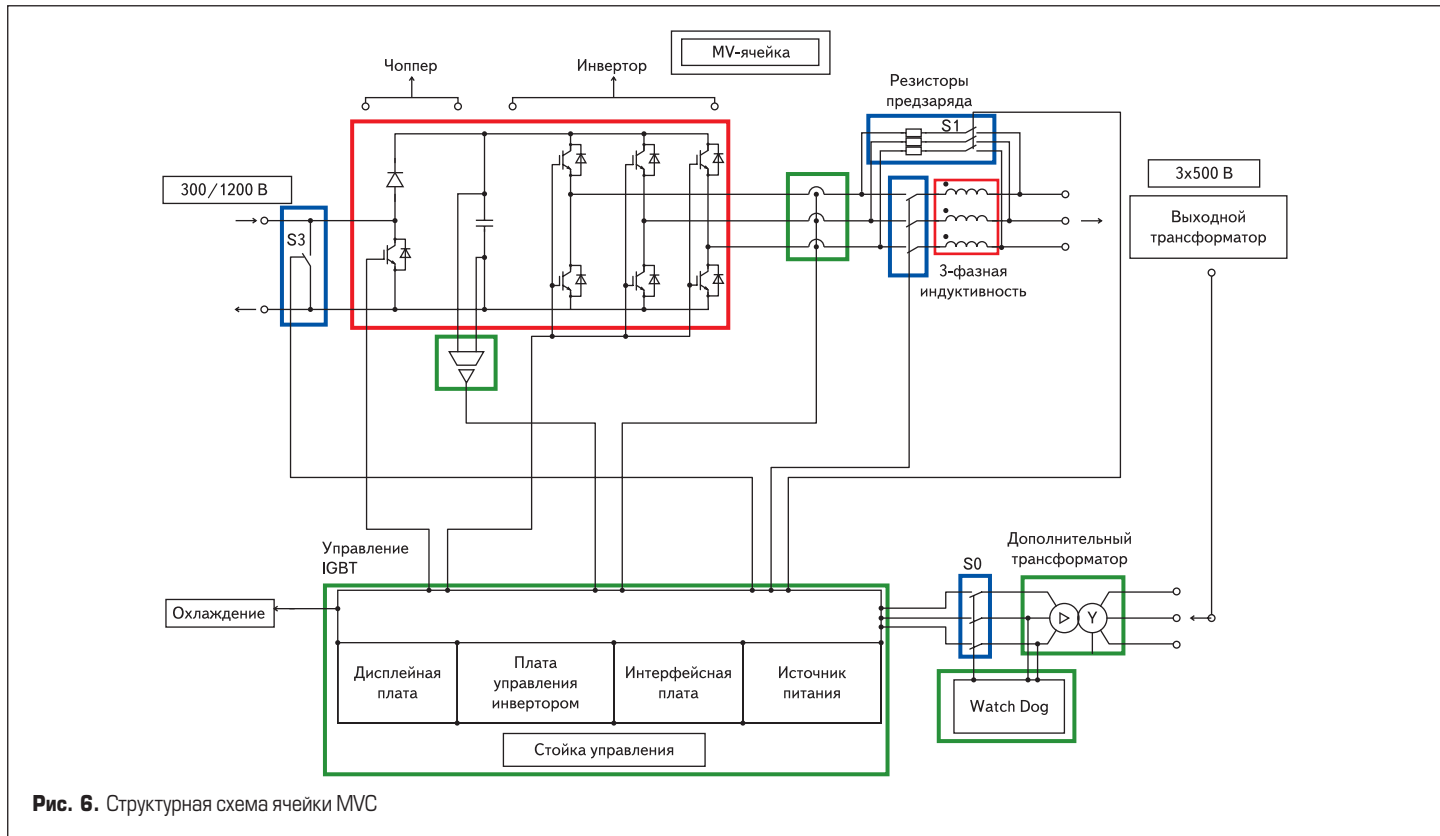


Рис. 6. Структурная схема ячейки MVC

- Снимается питание ячеек, статусный сигнал остановки всех ячеек поступает на супервизор.
- Неисправность инвертора**
- Блокируются любые сигналы управления чоппером и инвертором.
- Замыкается цепь питания неисправной ячейки контактором S3.
- Выход ячейки отключается контактором S2.
- Статусный сигнал отключения поступает на супервизор.

Принцип последовательного соединения ячеек многоуровневого конвертора позволяет не только поддерживать питание на звене постоянного тока инверторов, но и работать при наличии некоторого числа неисправных «уровней». Для этого в конструкции предусматривается 1–2 «избыточных» ячейки, которые при нормальной работе закорочены по DC-шине. Указанная особенность является одним из принципиальных преимуществ многоуровневой структуры перед традиционными решениями использования высоковольтных ключей. Даже пробой ключей инвертора, имеющий фатальные последствия для традиционных схемных решений, в данном случае не приводит к отказу или остановке работы устройства.

При обнаружении неисправности ячейки супервизор мгновенно переключает ее чопперный ключ в состояние постоянной проводимости и блокирует сигналы управления инвертором, после чего дефектный «уровень» дополнительно закорачивается механическим контактором для снижения потерь проводимости. Если отказ произошел в нескольких ячейках, преобразователь продолжает работать при пониженном уровне выходной мощности. Описанное свойство является чрезвычайно важным для электронных устройств, предназначенных для долговременной необслуживаемой эксплуатации, например ветроэнергетических установок.

Чопперный каскад конвертора работает как релейный и управляющий элемент, во втором случае регулирование напряжения производится за счет коммутации тока во входной индуктивности. Это может быть распределенная характеристика подводящего кабеля (офшорная станция) или индуктивность встроенного дросселя (прибрежная станция). Супервизор управляет работой чоппера в ШИМ-режиме, регулируя напряжение на звене постоянного тока инверторов  $V_{dc\_cell}$  таким образом, чтобы поддерживать выходное напряжение преобразователя на заданном уровне. Алгоритм управления меняется в зависимости от числа работающих ячеек, выходного сигнала генератора и тока нагрузки.

Выходной ток трехфазного инвертора, построенного на модулях IGBT с рабочим напряжением 1700 В, регулируется ШИМ-сигналом супервизора. На рис. 7 показан алгоритм, по которому производится изменение среднеквадратичного значения тока инвертора  $I_s$  относительно номинального значения  $I_n$  в зависимости от  $V_{dc\_cell}$ . При напряжении на DC-шине, превышающем 1200 В, ячейка отключается с помощью чоппера и контактора, как было показано ранее. Трехфазный индуктор, установленный на выходе инвертора, предназначен для сглаживания пульсаций вы-

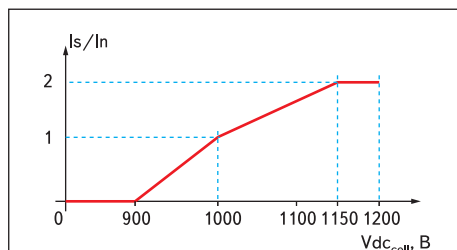


Рис. 7. Алгоритм управления током инвертора

ходного тока и ограничения уровня высокочастотных гармоник в сигнале, поступающем на трансформатор.

Входы и выходы всех ячеек могут быть отключены от силовых цепей с помощью электромеханических контакторов. Так же как и полупроводниковые приборы, они коммутируют только низковольтные напряжения, не превышающие 1–2 кВ. Входные нормально-замкнутые контакторы (S3) шунтируют все ячейки перед запуском преобразователя. Благодаря этому при обнаружении неисправности какой-либо из ячеек она может быть исключена уже при пуске, и центральный контроллер будет управлять работой преобразователя с пониженными рабочими характеристиками с учетом уменьшенного числа «уровней». Предварительный заряд конденсаторов DC-шины и подключение инвертора к сети осуществляется с помощью двух мощных трехфазных контакторов S1, S2.

Для обеспечения надежного режима работы преобразователя схема ячейки должна допускать ее безопасное многократное подключение/отключение к/от сети... Решение этой задачи связано с обеспечением гальванической изоляции силовой части ячейки от супервизора, причем напряжение не должно поступать на нее даже в состоянии отключения. Плата Watch Dog имеет автономное питание и управляется от супервизора по оптическому кабелю, включение или выключение платы управления ячейки производится посредством статического реле S0. Это единственный элемент, на котором сохраняется напряжение при отключении ячейки (отмечено красным кругом на рис. 9а).

Каждая ячейка имеет отдельный источник питания — только так можно обеспечить необходимый высоковольтному преобразователю уровень изоляции. Вспомогательный трансформатор, рассчитанный на напряжение

Конструкция

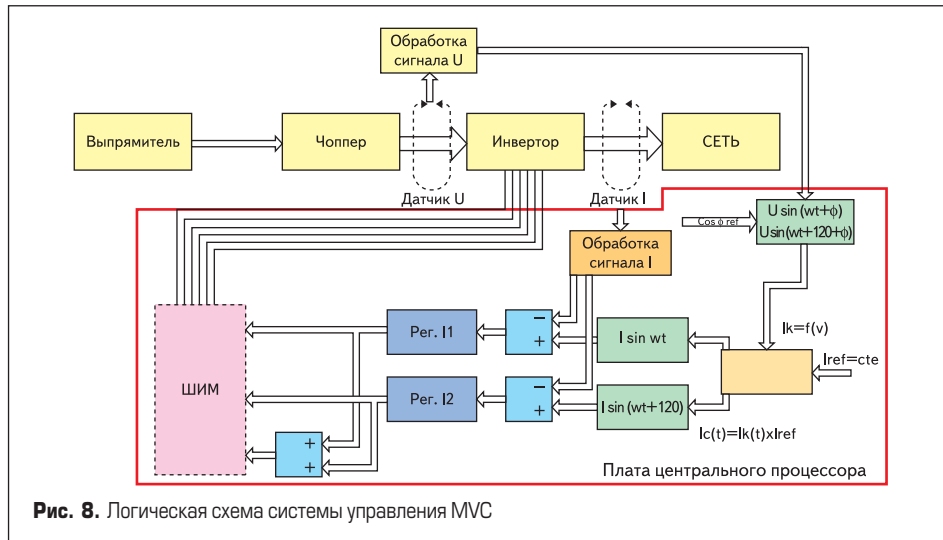


Рис. 8. Логическая схема системы управления MVC

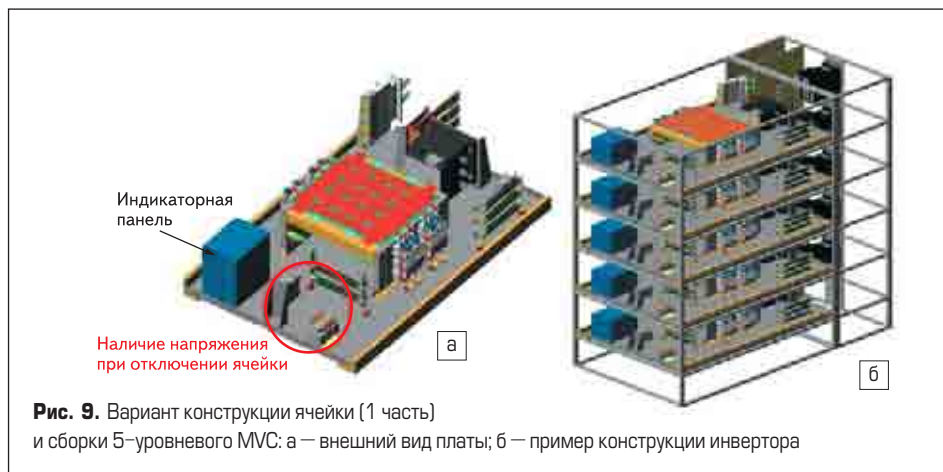


Рис. 9. Вариант конструкции ячейки (1 часть) и сборки 5-уровневого MVC: а — внешний вид платы; б — пример конструкции инвертора

$V_{iso}$  не менее 6000 VDC, используется также и для синхронизации контрольных сигналов платы управления инвертором с фазами сетевого напряжения.

Компания SEMIKRON выпускает два вида блоков, предназначенных для работы в составе многоуровневого MVC. В первом применяются интеллектуальные силовые модули SKiiP, имеющие в своем составе драйверы и датчики, второй построен на основе дискретных силовых модулей IGBT с отдельной установкой плат управления и сенсоров. Кроме датчиков тока, напряжения и температуры, аналоговые сигналы которых используются процессором для формирования импульсов управления, каждая ячейка имеет необходимый для работы схемы защиты детектор обрыва фазы.

Схема управления конвертером (рис. 8) выполняет две функции, главной из которых является регулирование выходного тока по закону аналогового пропорционально-интегрального управления (PI regulation) с запаздыванием ( $\cos \phi$ ) по отношению к сетевому напряжению. Отставание тока вычисляется на основании информации о напряжении сети и данных, поставляемых супервизором. Значение  $\cos \phi$  может задаваться и регулироваться периферийным пользовательским контроллером независимо от выходного сигнала генератора. Управление током производится в ШИМ-режиме по сигналам обратной связи, определяющим разницу текущего значения и величины уставки. Значение уставки определяется величиной тока, заданной супервизором

( $I_{ref}$ ) с учетом сетевого напряжения в соответствии с алгоритмом, показанным на рис. 7.

Второй функцией системы управления является мониторинг и обработка сигналов неисправности узлов (источников питания, инверторов и т. д.), которые далее подаются на интерфейсную плату. Дополнительная информация об отказах (перегрузка по току, перегрев) поступает с драйверов, управляющих IGBT-модулями, а также во время регулярного контроля состояния вторичных напряжений питания.

Интерфейсная плата также может формировать сигнал отключения чоппера и управлять ключами шунтирования ячеек (S3). Кроме этого, она выполняет следующие функции:

- прием сигналов управления супервизора;
- синхронизация работы ячеек;
- изоляция сигналов супервизора с помощью оптического кабеля;
- управление чопперным каскадом;
- пуск и остановка инвертора;
- мониторинг состояния источников питания, обрыва фазы сетевого напряжения, сигналов неисправности чопперов и инверторов, выдача обобщенных сигналов готовности или неисправности ячеек на супервизор.

Драйверы IGBT осуществляют обычные функции управления изолированными затворами силовых модулей, включая защиту от перегрузки по току и перегреву. Кроме того, благодаря наличию гальванической развязки платы управления являются дополнительным изолирующим барьером между сигнальными и силовыми цепями.

Функционально ячейка состоит из двух частей: первая включает чоппер, инвертор и два трехфазных контактора, именно эта часть устанавливается в стойку, что обеспечивает удобство обслуживания и высокую ремонтопригодность. Внешний вид платы с указанными узлами показан на рис. 9а. На плате также располагаются установленные рядом с модулями IGBT конденсаторы звена постоянного тока. При сборке платы монтируются на изолирующих подложках, обеспечивающих напряжение изоляции между ячейками более 6 кВ. При установке ячеек в стойку индикаторные панели на краю платы должны обеспечивать обслуживающему персоналу хороший доступ к информации.

Вторая часть содержит сглаживающую индуктивность и трансформатор, устанавливаемые на выходе ячейки. Эти элементы монтируются в отдельных корпусах, размещаемых внутри преобразовательной станции в непосредственной близости от соответствующих ячеек и на одном уровне.

Пример конструкции инвертора, имеющего 5 уровней, приведен на рис. 9б. Стойка обеспечивает беспрепятственный доступ к ячейкам и простую и быструю их замену. Каждая ячейка может быть заменена и подключена к единой системе охлаждения и силовым цепям с помощью следующих соединений:

- DC-шина чоппера — 2 терминала;
- AC-выход инвертора — 3 терминала;
- питание платы управления и вентилятор (в режиме жидкостного охлаждения) — 3 терминала;
- радиатор жидкостного охлаждения — 2 терминала.

Моделирование и испытания

Ниже представлены результаты моделирования предлагаемой схемы многоуровневого преобразователя. На показанных далее графиках использованы следующие обозначения:

- $V_{ond}$  — линейное (межфазное) напряжение инвертора;
- $I_{ond}$  — фазный ток инвертора;
- $I_{conv}$  — суммарный ток преобразователя;
- $V_{dc}$  — входное напряжение постоянного тока;
- $V_{dc,cell}$  — напряжение на DC-шине инвертора.

На рис. 10а и б показаны следующие эпюры: сетевое напряжение ( $V_{ond}$ ), ток одной ячейки в той же фазе ( $I_{ond,cell1}$ ) и суммарный ток конвертера ( $I_{conv}$ ), поступающий в сеть. Как видно из графиков, ток ячейки находится в фазе с напряжением. С другой стороны, токи ячейки и преобразователя ( $I_{conv}$ ,  $I_{ond,cell1}$ ) имеют фазовый сдвиг, обусловленный запаздыванием, вносимым трансформатором. Обратите внимание на низкий уровень гармонических искажений формы суммарного выходного тока.

Анализ формы выходного тока при нормальной работе всех «уровней» и отключении одной из ячеек представлен на рис. 10в–г:

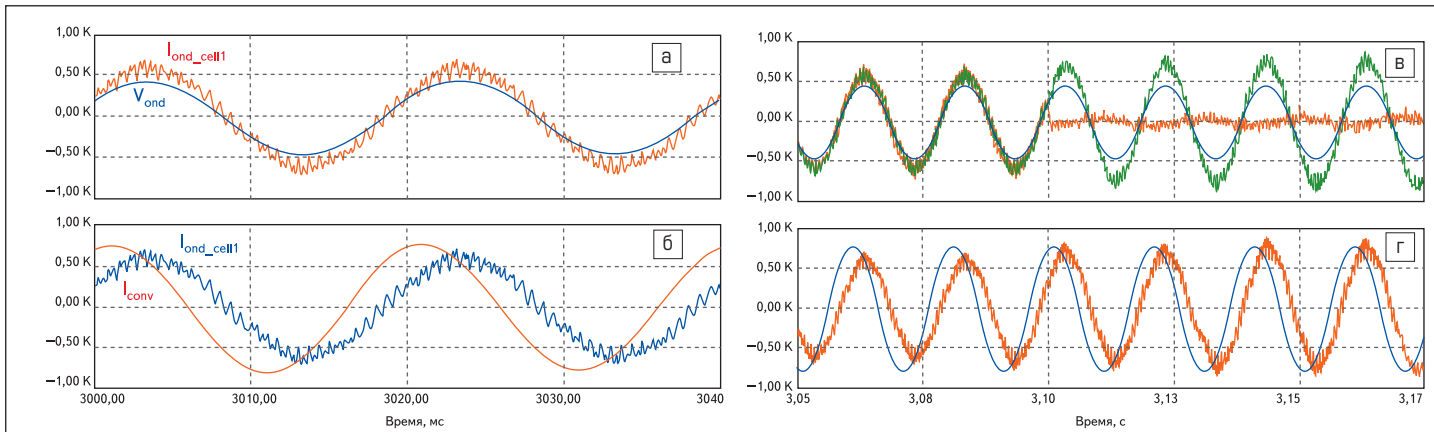


Рис. 10. Сетевое напряжение, общий ток преобразователя, выходной ток ячейки (а; б). Анализ влияния отказа ячейки на работу преобразователя (в; г)

- в — ток и напряжение ячейки 1–1, ток ячейки 1–2;
- г — ток ячейки 1–2 и ток нагрузки.

Как видно из графиков, отказ одной из ячеек (в нашем случае 1–1) не приводит к заметным искажениям формы выходного сигнала или появлению опасных для силовых ключей переходных процессов.

Экспериментальная проверка была проведена на 5-уровневом макете преобразователя при двух условиях работы:

1. Пониженное напряжение ( $V_{dc\_cell} = 200\text{ В}$ ,  $V_{dc\_max} = 1200\text{ В}$ )
2. Номинальное напряжение ( $V_{dc\_cell} = 1000\text{ В}$ ,  $V_{dc\_max} = 6000\text{ В}$ )

Процесс нарастания напряжения на звене постоянного тока в фазе запуска преобразователя, показанный на рис. 11, состоит из 3 этапов:

1. Предварительный заряд конденсаторов через выпрямитель, антипараллельные диоды IGBT и резисторы.

2. Готовность (напряжение на DC-шине инверторов ячеек достигло номинального значения, на супервизор послан сигнал готовности).

3. Включение бустерного каскада.

Алгоритм управления инверторами ячеек предусматривает наличие фазового сдвига, позволяющего компенсировать основную часть высокочастотных гармоник, генерируемых при переключении транзисторов. Графики на рис. 12а демонстрируют полученный результат: уровень гармоник в сигнале суммарного тока конвертора намного меньше, чем у отдельных ячеек. Для подтверждения этого факта было использовано быстрое преобразование Фурье (FFT — Fast Fourier Transform) для каждого сигнала. Спектр тока ячейки  $I_{ond\_cell1}$ , состоящий из основной частоты (частота ШИМ) и ее гармоник, приведен на рис. 12б. Рис. 12в демонстрирует, что в выходном токе преобразователя, являющемся суммой токов инверторов каждого «уровня», гармонические составляющие существенно подавлены за счет фазового сдвига.

Управление уровнями организовано таким образом, что супервизор допускает только два аварийных отключения ячейки, перед тем как полностью изолировать ее с помощью шунтирующего ключа. После каждой из двух разрешенных остановок «уровень» автоматически перезапускается, такой режим обеспечивает максимально надежную работу системы.

Графики на рис. 13 иллюстрируют процессы отключения и рестарта ячейки. Очень важно, что при этом не наблюдается возникновения переходных процессов, способных вывести из строя силовые ключи. Эпюра, демонстрирующая изменение общего тока преобразователя при шунтировании одной из ячеек, представлена на рис. 13а. При этом конвертор продолжает работать, а его максимальный

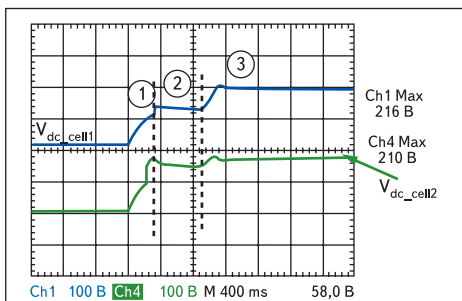


Рис. 11. Напряжение на DC-шине при пуске преобразователя

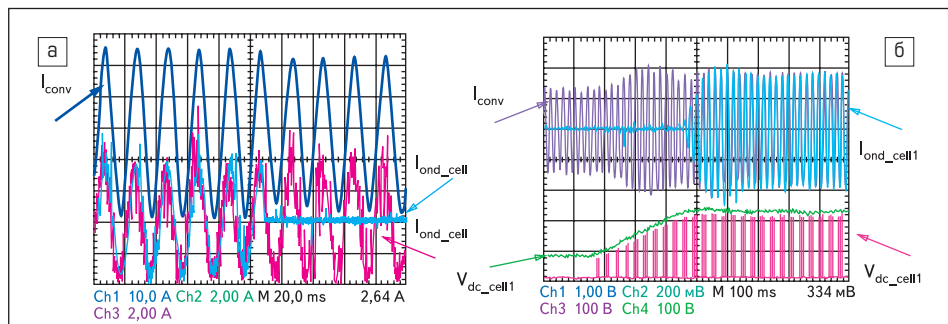


Рис. 13. Процессы отключения и рестарта ячейки: а — отключение ячейки; б — перезапуск ячейки

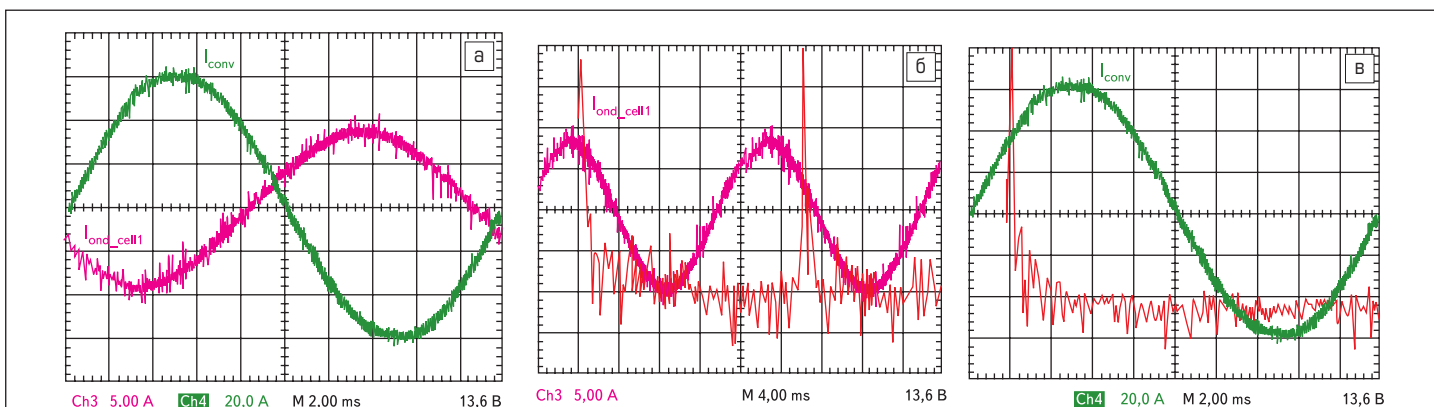


Рис. 12. Компенсация высокочастотных гармоник, генерируемых при переключении транзисторов: а — ток ячейки и суммарный ток конвертора; б; в — преобразование Фурье для тока ячейки и суммарного тока конвертора

выходной ток уменьшается на величину тока одного инвертора.

Процесс повторного запуска ячейки, оставленной в результате обнаружения неисправности, показан на рис. 13б. График  $V_{dc\_cell}$  демонстрирует, как нарастает напряжение на звене постоянного тока при рестарте чоппера. Одновременно запускается инвертор и увеличивается выходной ток преобразователя. Очень важно, что в процессе выполнения всех указанных действий не наблюдается возникновения опасных переходных процессов (выбросов напряжения, перегрузок по току и т. д.).

### Оптимизация архитектуры конвертора

Выбор компонентов преобразователя и оценка их предельных электрических характеристик должны производиться на основе следующих исходных данных:

- выходная мощность конвертора;
- выходное напряжение генератора;
- напряжение сети;
- специфические характеристики конструкции для конкретного применения.

При заданных параметрах генератора и требованиях к сетевому напряжению необходимо произвести выбор алгоритма работы устройства. Многоуровневая структура MVC позволяет использовать два режима работы:

- Регулирование мощности инверторов ячеек (макс. мощность — 250 кВт) независимо от количества уровней. При использовании такого алгоритма выходная мощность преобразователя снижается при отключении ячейки.
- Регулирование мощности конвертора (которая всегда является максимальной — 1500 кВт) независимо от количества уровней. При этом мощность ячеек должна быть выбрана с запасом, чтобы обеспечивать заданные выходные характеристики при отключении ячеек.

С точки зрения экономической эффективности работы ВЭУ более предпочтительным является первый вариант, не требующий при-

менения ячеек с избыточной мощностью. Расчеты рабочих режимов преобразователя производились на основе следующих исходных данных.

Номинальный режим работы преобразователя:

- выходная мощность генератора  $V_g$  — 1,5 МВА;
- выходное напряжение генератора (линейное)  $U_g$  — 3000 В;
- ток генератора  $I_g$  — 288 А;
- напряжение DC-шины  $V_{dc\_conv}$  — 4020 В;
- ток DC-шины  $I_{dc\_conv}$  — 373 А;
- входное регулируемое напряжение DC-шины ячейки  $V_{dc}$  — 670 В;
- напряжение на звене постоянного тока инвертора  $V_{dc\_cell}$  — 1000 В;
- входной ток DC инвертора  $I_{dc\_cell}$  — 250 А;
- выходное напряжение инвертора (линейное)  $V_{ond}$  — 500 В;
- фазный ток инвертора  $I_{ond}$  — 288 А

Режим работы ячейки:

- выходная мощность ячейки  $P_{out}$  — 250 кВт;
- частота выходного напряжения  $f_{out}$  — 60 Гц;
- $\cos \varphi$ : — 1;
- частота ШИМ-инвертора  $f_{sw\_o}$  — 1,5 кГц;
- частота ШИМ-чоппера  $f_{sw\_b}$  — 1 кГц.

Определение мощности потерь и температуры перегрева (данные указаны в таблице) выполнено с помощью программы теплового расчета SemiSel [7].

### Заключение

Многоуровневая архитектура высоковольтных преобразователей обеспечивает следующие преимущества:

- Избыточность, обусловленная архитектурой MVC. Нарастивание напряжения и мощности достигается увеличением количества ячеек, не требуется применение редких и дорогих высоковольтных ключей.
- Возможность использования недорогих стандартных низковольтных электронных компонентов, обеспечивающая максимальную экономическую эффективность изделия.
- Удобство работы с синхронными генераторами (применительно к ВЭУ): поскольку данный тип машин не нуждается в возбуждении, инверторные ячейки могут размещаться вдали от ветрогенераторных башен в преобразовательной станции, подключенной к сети.
- Возможность шунтирования избыточных ячеек: предотвращение повреждения генератора и инверторов при пусковых перегрузках или при забросе оборотов генератора. Сохранение работоспособности преобразователя в случае отказа некоторого количества ячеек.
- Устрановка индуктивности между выпрямителем и конденсаторами звена постоянного тока: сглаживание пульсации тока генератора и предотвращение перегрузок машины, обусловленных пиковыми токами.
- Низкий уровень гармонических искажений выходного напряжения благодаря высокой эквивалентной частоте.
- Простота управления выходными параметрами преобразователя (ток,  $\cos \varphi$ ).



Рис. 14. Внешний вид базового модуля SEMIKUBE 1

В декабре 2004 года компания SEMIKRON представила новый проект, выполненный в рамках глобальной исследовательской сети, состоящей из 9 научных центров, расположенных в Южной Корее, Австралии, Южной Африке, США, Франции, Англии, Бразилии, Индии и Словении. Потребителям была предложена конструктивная платформа со сверхнизкой индуктивностью силовых шин, имеющая в зависимости от исполнения мощность 100–900 кВт [8]. Компактный, стандартизированный универсальный модуль, получивший название SEMIKUBE, предназначен для решения широкого круга задач преобразования энергии (рис. 14). Разработка первой в мире универсальной инверторной платформы явилась результатом более чем 45-летней работы SEMIKRON в области проектирования силовых сборок. Модули семейства включают систему охлаждения, устройство управления, датчики и силовой каскад, который может содержать выпрямитель, чоппер и инвертор (однофазный или трехфазный). Таким образом, платформа SEMIKUBE является практически идеальным «единичным блоком» в качестве ячейки многоуровневого преобразователя.

### Литература

1. Schibli Rufer N., Briguet Ch. A direct coupled 4 — Quadrant multilevel converter for 16 2/3 Hz traction systems. IEE N 429, Sept. 1996.
2. Briag A., Sargos F. Medium Voltage Converter. SEMIKRON International, 2003.
3. Sargos F. STACK Marketing Manager. Power electronics for converters in windmills. SEMIKRON France.
4. Schreiber D. Материалы презентаций. SEMIKRON International, 2003–2005.
5. Колпаков А. И. Альтернативная энергетика и SEMIKRON // Электронные компоненты. 2003. № 9.
6. Колпаков А. И. Энергия, принесенная ветром. // Силовая электроника. 2005. № 3.
7. Колпаков А. И. Принципы работы и особенности программы теплового расчета SEMISEL // Электронные компоненты. 2004. № 6.
8. Колпаков А. И. Инверторная платформа SEMIKUBE — quadratisch, praktisch, gut! // Компоненты и технологии. 2005. № 6.

Таблица

Параметр	Расчетные значения		
	6 ячеек	5 ячеек	4 ячейки
Потери в ячейке, Вт	2909	2712	2548
Потери в конвертере, Вт	17 454	13 560	10 192
КПД конвертора, %	98,8	98,9	98,99
Потери в трансформаторе, Вт (при КПД 97%)	7500		
Суммарные потери (трансформатор + конвертор), Вт	62 454	51 060	40 192
КПД (трансформатор + конвертор), %	96	96,1	96,13
$P_{conv\_max}/P_{gen}^*$ , %	98,8	82,6	66,2
$P_{grid}/P_{gen}^{**}$ , %	96	80	64

Примечания.

\* Отношение максимально достижимой мощности преобразователя к максимальной механической мощности генератора

\*\* Отношение максимальной мощности, отдаваемой в сеть, к максимальной механической мощности генератора